



**Doğal Zeolit Klinoptilolit  
Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatakta Kurutulması**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 112M231**

Proje Yürütücüsü:  
**Doç.Dr. Görkem KÜLAH**

Danışman:  
Doç. Dr. Murat KÖKSAL

Bursiyer(ler):  
Vahid NASİRİMAREKANI  
Onur YAMAN  
Cihan ÖCAL  
Filiz AYDIN

EYLÜL 2015  
ANKARA

## Önsöz

Bu rapor 15.09.2012 – 15.09.2015 tarihleri arasında mikron boyutundaki nem oranı yüksek parçacıkların en verimli ve ekonomik biçimde kurutulmasını sağlamak için bir akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu sistemi tasarlamak ve kurmak için yürütülen çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, zeolit parçacıklarının kurutulması için endüstriyel boyutta kurulacak olan sistemin tasarımına ışık tutacaktır.

Proje ekibi bu çalışma için 112M231 no'lu proje kapsamında gerekli finansal desteği sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerini sunar.

Projede kullanılan klinoptilolit parçacıklarını sağlayan ROTA Madencilik A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Proje kapsamında deney sistemlerinin üretiminde büyük bir özveri ile çalışan Hacettepe Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü teknisyenlerinden Hasan Çelikli'ye de ayrıca teşekkür ederiz.

Görkem Külâh, Murat Köksal,  
Vahid Nasirimarekani, Onur Yaman  
Ankara, 2015

## İçindekiler

Önsöz .....	i
Şekiller Listesi .....	iv
Çizelgeler Listesi .....	ix
Simgeler ve Kısaltmalar Listesi .....	xi
Özet .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Raporun Düzeni ve İçeriği .....	4
2. LİTERATÜR ÖZETİ .....	5
2.1 Doğal Zeolitın Kurutulması İçin Uygulanabilir Teknoloji Seçimi .....	5
2.2 Taşkın-Akışkan Yataklar ve Geometrik Parametreleri .....	8
3. DOĞAL ZEOLİT KLİNOPTİLOLİT .....	12
3.1 Klinoptilolit Saflığının Tespit Edilmesi .....	12
3.2 Gerçek ve Yığın Yoğunluğunun Tespit Edilmesi .....	14
3.3 Parçacık Boyutunun Tespit Edilmesi .....	14
3.4 Nem İçeriğinin Tespit Edilmesi .....	15
3.5 Parçacık Şekil Analizi .....	16
4. SOĞUK SİSTEMLERDE YAPILAN HİDRODİNAMİK ÇALIŞMALAR .....	18
4.1 Hidrodinamik Çalışmalar için Kullanılan Deney Sistemleri .....	18
4.1.1 Konik ve Yarım Konik Taşkın Yataklar .....	18
4.1.2 Taşkın-Akışkan Yataklar .....	24
4.2 Tam ve Yarım Konik Taşkın Yataklarda Gaz-Katı Akışının Karakterizasyonu, Basınç Düşümü Ve Minimum Akışkanlaşma Hızı Ölçümleri .....	27
4.2.1 Akış borusuz yarım taşkın yatakta yapılan ön çalışmalar .....	29
4.2.2. Akış borulu yarım ve tam taşkın yataklarda yapılan hidrodinamik çalışmalar .....	29
4.3 Konik ve Yarım Konik Taşkın- Akışkan Yataklarda Gaz-Katı Akışının Karakterizasyonu, Basınç Düşüşü ve Minimum Akışkanlaşma Hızı Ölçümleri .....	37
4.3.1 60 Derecelik Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatak ile İlgili Deney Sonuçları .....	37
4.3.2 30 Derecelik Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatak ile İlgili Deney Sonuçları .....	42
4.3.3 30 ve 60 Derecelik Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatakların Karşılaştırılması .....	49
4.4 Parçacık Konsantrasyonu Ölçümleri .....	52
4.4.1 Sistem Hakkında Genel Bilgi .....	52
4.4.2 Parçacık Konsantrasyonu Tayininde Kullanılan Kalibrasyon Denkleminin Belirlenmesi .....	57
4.4.3 Parçacık Konsantrasyonu Ölçüm Sonuçları .....	62
4.5 Isı Transferi Ölçümleri .....	69

4.5.1. Yarım (Kesit) Taşkın-akışkan Yatakta Isı Transferi Çalışmaları .....	69
4.5.1.1 Giriş .....	69
4.5.1.2. Deney Düzenek ve Çalışma Koşulları .....	70
4.5.1.3 Yatak-yüzey Isı Transferi Ölçümü ve Teorisi .....	75
4.5.1.4 Isı Transferi Katsayısının Halka ve Taşkın Bölgelerinde Belirlenmesi .....	77
<b>KURUTMA SİSTEMİ VE DENEYLERİ .....</b>	<b>85</b>
5.1. Kurutma Sistemi .....	85
5.1.1 Akış borulu taşkın-akışkan yatak .....	85
5.1.2 Hava Isıtıcı Sistemi .....	91
5.1.3 Ölçüm sistemleri .....	93
5.1.3.1 Basınç Ölçerler .....	93
5.1.3.2 Nem Ölçerler .....	95
5.1.3.3 Isıl Çiftler .....	98
5.1.3.4 Hava Debisi Ölçümleri .....	100
5.1.3.5 Veri Toplama Sistemi .....	100
5.2 Kurutma Deneyleri .....	101
5.2.1 Kurutma Enerji İhtiyacı .....	115
5.3 Sonuçlar .....	117
<b>GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>119</b>
<b>REFERANSLAR .....</b>	<b>124</b>
<b>Ek-A.....</b>	<b>129</b>

## Sekiller Listesi

<b>Şekil 1.1.</b> Dağıtıcıları konik ve düz tabanlı olan taşkın-akışkan yataklar (Sutanto, 1983).....	3
<b>Şekil 2.1.</b> Akış borulu taşkın-akışkan yatak	8
<b>Şekil 2.2.</b> Akış borulu taşkın-akışkan yataklarda yatak hidrodinamiğini etkileyen geometrik tasarım parametreleri: $D_c$ : yatak çapı, $H_c$ : konik kısım yüksekliği, $D_o$ : yatak taban çapı, $D_i$ : gaz giriş çapı, $L_H$ : kaldırma yüksekliği, $L_T$ : akış borusu uzunluğu, $D_T$ : akış borusu iç çapı, $\gamma$ : konik kısım açısı (Altıbar vd., 2011). ....	9
<b>Şekil 3.1.</b> Zeolit numunesine ait X ışını kırınım şeması .....	13
<b>Şekil 3.2.</b> RIR yöntemi ile yapılan nicel analiz sonucu.....	13
<b>Şekil 3.3.</b> Klinoptilolit örneğine ait TGA grafiği.....	16
<b>Şekil 3.4.</b> Öğütülmüş Klinoptilolit taneciklerinin geometrik şekilleri .....	17
<b>Şekil 3.5.</b> Karakteristik Klinoptilolit kristal yapısı .....	17
<b>Şekil 4.1.</b> Giriş, orifis giriş çapı ve kolon çapı sabit tutulan, farklı konik açıları için belirlenmiş taşkın yatak geometrileri ( $\gamma = 30^\circ, 45^\circ$ ve $60^\circ$ ).....	19
<b>Şekil 4.2.</b> Önceki projede üretilen yatakların konik kısımlarının ilk görüntüleri.....	19
<b>Şekil 4.3.</b> Gaz girişi aparatı .....	20
<b>Şekil 4.4.</b> Gaz girişi için hazırlanan farklı iç çaplardaki pirinç diskler ve pirinç filtre .....	21
<b>Şekil 4.5.</b> İmalatı yapılan akış borularının örnekleri .....	21
<b>Şekil 4.6.</b> Yarım konik taşkın yatağın fotoğrafı ( $\gamma = 30^\circ$ ).....	22
<b>Şekil 4.7.</b> Akış borulu yarım taşkın yatağın yandan görünümü .....	23
<b>Şekil 4.8.</b> Hızlı kamera deney düzeneği .....	24
<b>Şekil 4.9.</b> Gaz dağıtıcı görevindeki delikli konik bölge duvarı .....	25
<b>Şekil 4.10.</b> Akışkanlaştırma gazının sisteme beslenmesi için tasarlanan gaz haznesi.....	25
<b>Şekil 4.11.</b> 60 derecelik yarım taşkın-akışkan yatak için duvar bölgesi gaz dağıtıcı tasarımı.....	26
<b>Şekil 4.12.</b> 30 derecelik yarım konik yatakta parçacık davranışı ( $U_o = 15$ m/s, $D_i = 4$ mm, $H_b = 8$ cm) .....	27
<b>Şekil 4.13.</b> 45 derecelik yarım konik yatakta parçacık davranışı ( $U_o = 15$ m/s, $D_i = 4$ mm, $H_b = 8$ cm) .....	28
<b>Şekil 4.14.</b> 60 derecelik yarım konik yatakta parçacık davranışı ( $U_o = 15$ m/s, $D_i = 4$ mm, $H_b = 8$ cm) .....	28
<b>Şekil 4.15.</b> Tam ve yarım yatakta elde edilen basınç düşümü eğrilerinin karşılaştırılması ....	32
<b>Şekil 4.16.</b> Tam ve yarım yatakta elde edilen basınç düşümü eğrilerinin karşılaştırılması ....	33
<b>Şekil 4.17.</b> Tam ve yarım yatakta elde edilen basınç düşümü eğrilerinin karşılaştırılması ....	33
<b>Şekil 4.18.</b> Yarım taşkın-akışkan yatak ölçüleri ( $\gamma = 60^\circ$ ).....	38
<b>Şekil 4.19.</b> 60 derecelik yatak için 4 farklı akışkanlaşma hızlarında ölü bölgelerin durumu (Kırmızı delikli çizgilerin içindeki alan ölü bölgeleri göstermektedir) .....	39

<b>Şekil 4.20.</b> Artan taşkınlaşma gaz hızlarında ( $U_o$ ) yatak basınç düşüşü ölçümleri, $\gamma = 60^\circ$ . ( $U_{ms,s}$ değerleri oklarla gösterilmiştir).....	40
<b>Şekil 4.21.</b> Çizelge 4.12'deki koşullar için artan hava hızlarında minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları, $\gamma = 60^\circ$ . ....	41
<b>Şekil 4.22.</b> Yarım yatak ölçüleri ( $\gamma = 30^\circ$ ).....	43
<b>Şekil 4.23.</b> 30 derecede ölü bölgelerin durumu, $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği. ....	44
<b>Şekil 4.24.</b> 30 derecede ölü bölgelerin durumu, $\gamma = 30^\circ$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı.....	45
<b>Şekil 4.25.</b> Artan taşkınlaşma gaz hızlarında ( $U_o$ ) yatak basınç düşüşü ölçümleri, $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği. ( $U_{ms,s}$ değerleri oklarla gösterilmiştir) .....	46
<b>Şekil 4.26.</b> Çizelge 4.14'deki koşullar için artan hava hızlarında minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları, $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği. ....	47
<b>Şekil 4.27.</b> Artan taşkınlaşma gaz hızlarında ( $U_o$ ) yatak basınç düşüşü ölçümleri, $\gamma = 30^\circ$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı. ( $U_{ms,s}$ değerleri oklarla gösterilmiştir).....	48
<b>Şekil 4.28.</b> Çizelge 4.15'deki koşullar için artan hava hızlarında minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları, $\gamma = 30^\circ$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı. ....	49
<b>Şekil 4.29.</b> Minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızının akışkanlaşma gaz hızı ile değişimi. ....	50
<b>Şekil 4.30.</b> Yatak basınç düşümünün artan taşkınlaşma gazı hızı ile değişimi ( $U_f = 4.92$ m/s) .....	50
<b>Şekil 4.31.</b> PV6 parçacık hız/konsantrasyon ölçüm sistemi.....	53
<b>Şekil 4.32.</b> Proje kapsamında kullanılacak olan optik sondaların uç kısımlarının fotoğrafı....	54
<b>Şekil 4.33.</b> Sonda tipleri: Tip I: Parçacık boyutu << sonda çapı; Tip II: Parçacık boyutu > sonda çapı. ....	55
<b>Şekil 4.34.</b> Parçacık hızı, konsantrasyonu ve akısı ölçümü aşamaları.....	56
<b>Şekil 4.35.</b> Parçacık konsantrasyonu ölçümü için kurulan kalibrasyonu düzeneği.....	58
<b>Şekil 4.36.</b> Hazırlanan orjinal/siyaha boyanmış parçacık karışımları. ....	59
<b>Şekil 4.37.</b> Parçacık hızı analiz cihazının ön paneli (Fiber Optik Sonda El Kitabı).....	60
<b>Şekil 4.38.</b> Boyanmış parçacık karışımları kullanılarak elde edilen konsantrasyon-voltaj ilişkisi .....	61
<b>Şekil 4.39.</b> Optik sondanın yarım taşkın-akışkan yatakta taşkın bölgesine yerleştirilmiş fotoğrafı.....	62
<b>Şekil 4.40.</b> Optik sondanın yarım taşkın-akışkan yatakta halka bölgesine yerleştirilmiş fotoğrafı .....	63
<b>Şekil 4.41.</b> Parçacık konsantrasyonunun radyal değişimi (Deney seti 1: $U_o = 4.6$ m/s ve $U_f = 0$ ).....	65
<b>Şekil 4.42.</b> Taşkınlaşma gaz hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna olan etkisi (Deney seti 1-3: $U_f = 0$ ).....	66

<b>Şekil 4.43.</b> Taşkınlaşma gaz hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna olan etkisi (Deney seti 1-3: $U_f = 0$ ).....	66
<b>Şekil 4.44.</b> Taşkınlaşma hızının parçacık konsantrasyonunun radyal değişimine olan etkisi (Deney seti 7,11,15: $U_f = 0$ ).....	67
<b>Şekil 4.45.</b> Akışkanlaşma hızının parçacık konsantrasyonunun radyal değişimine olan etkisi (Deney seti 1, 4-6, 7-10: $U_o = 4.6$ m/s) .....	68
<b>Şekil 4.46.</b> Farklı yatak tipleri için parçacık boyutu ( $d_p$ ) ile değişen yatak-yüzey ısı transferi katsayıları (Chatterjee vd.,1983).....	69
<b>Şekil 4.47.</b> Isı transferi deneylerinde kullanılan 30 derecelik yarım taşkın-akışkan yatağın geometrik ölçüleri .....	71
<b>Şekil 4.48.</b> Deney düzeneği ve ölçüm sistemi (a. OMEGA Rotametre (FT044-16-CA-VN) 0-60 lt/dk, b. DWYER Rotametre (RMC-103-BV) 20-200 SCFH, c. Yarım taşkın-akışkan yatak, d. Isı Transferi Sondası, e. Basınç Sensörü, f. Güç Kaynağı, g. Veri toplama cihazı (NI PCI-6820), h. Bilgisayar). .....	73
<b>Şekil 4.49.</b> Deney düzeneğinin fotoğrafı.....	74
<b>Şekil 4.50.</b> Isı transferi deneyleri için kullanılan LabVIEW programı .....	74
<b>Şekil 4.51.</b> Isı transferi sondasının yapım aşamasında ve sonrasındaki fotoğrafları.....	75
<b>Şekil 4.52.</b> Yatak-yüzey ısı transferi katsayısının hesaplanmasında kullanılan yaklaşım.....	76
<b>Şekil 4.53.</b> Isı transferi katsayısında, h, artan sıcaklık ile maksimum sapmalar.....	76
<b>Şekil 4.54.</b> Halka bölgesi ölçümleri için ısı transferi sondasının yatak içi pozisyonu .....	77
<b>Şekil 4.55.</b> Artan taşkın hava hızı ( $U_o$ ) ile $T_s$ değişimleri a) taşkın bölgesinde ( $U_f=0$ m/s) b) halka bölgesinde ( $U_f=10.6$ m/s). .....	78
<b>Şekil 4.56.</b> Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_o$ ) ile değişimi ( $U_f = 0$ m/s) .....	79
<b>Şekil 4.57.</b> Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_o$ ) ile değişimi ( $U_f = 3.58$ m/s) .....	79
<b>Şekil 4.58.</b> Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_o$ ) ile değişimi ( $U_f = 4.92$ m/s) .....	80
<b>Şekil 4.59.</b> Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_o$ ) ile değişimi ( $U_f = 6.24$ m/s) .....	80
<b>Şekil 4.60.</b> Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_o$ ) ile değişimi ( $U_f = 10.6$ m/s) .....	81
<b>Şekil 4.61.</b> Halka bölgesinde ortalama ısı transferi katsayılarının farklı akışkanlaşma ( $U_f$ ) hızlarında değişimi. ....	81
<b>Şekil 4.62.</b> Halka bölgesinde ortalama ısı transferi katsayılarının farklı taşkınlaşma ( $U_o$ ) hızlarında değişimi. ....	82

<b>Şekil 4.63.</b> Taşkın bölgesinde ısı transferi katsayılarının artan taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_f = 0$ ). .....	82
<b>Şekil 4.64.</b> Değişen akışkanlaşma ve taşkınlaşma havalarında cam parçacıklar ( $d_p=0.461$ mm) için ısı transferi katsayısının değişimi a) akışkanlaşma havasının etkisi b) taşkınlaşma havasının etkisi (Chatterjee v.d.,1983) .....	83
<b>Şekil 5.1.</b> Kurutma deneylerinde kullanılan deney sisteminin şematiği .....	87
<b>Şekil 5.2.</b> Taşkın-akışkan yataklı kurutucunun konik ve silindirik kısımlarının üç boyutlu çizimi ve fotoğrafı. ....	88
<b>Şekil 5.3.</b> Konik giriş parçasının fotoğrafı .....	89
<b>Şekil 5.4.</b> Akış borusu ve giriş parçası bağlandıktan sonraki konik kısım teknik ve 3 boyutlu çizimleri .....	89
<b>Şekil 5.5.</b> Akışkanlaşma havası haznesi .....	90
<b>Şekil 5.6.</b> Yatağın tamamlanmış ve monte edilmiş durumu .....	90
<b>Şekil 5.7.</b> Deney setinin yatılmış hali.....	91
<b>Şekil 5.8.</b> Hava ısıtıcısı ve haznesi.....	92
<b>Şekil 5.9.</b> Akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu .....	93
<b>Şekil 5.10.</b> RST ve OMEGA marka basınç ölçerler .....	94
<b>Şekil 5.11.</b> Yatak detayları ve basınç alınan noktalar (1. toplam basınç, 2. yatak basıncı ve 3. akışkan hava basıncı) .....	95
<b>Şekil 5.12.</b> Kalibrasyon sırasında farklı çözeltilere sahip tuz kavanozlarına nem ölçerin yerleştirilmesi .....	96
<b>Şekil 5.13.</b> SN286577 modeli için elde edilen kalibrasyon eğrisi .....	97
<b>Şekil 5.14.</b> SN286578 modeli için elde edilen kalibrasyon eğrisi .....	97
<b>Şekil 5.15.</b> SN286582 modeli için elde edilen kalibrasyon eğrisi .....	98
<b>Şekil 5.16.</b> OMEGA marka yatak içerisinde kullanılacak ısı çiftlerinin görüntüsü (OMEGA) ...	98
<b>Şekil 5.17.</b> Yatak ısı çiftlerinin yatak içinde aksiyel yerleştirilme noktaları (7 adet).....	99
<b>Şekil 5.18.</b> Yatak ısı çiftlerinin yatak içindeki pozisyonları (7 adet) .....	99
<b>Şekil 5.19.</b> Eksenel sıcaklık dağılımı .....	102
<b>Şekil 5.20.</b> Radyal sıcaklık dağılımı ( $z = 85$ mm, $U_f = 2$ m/s).....	102
<b>Şekil 5.21.</b> Radyal sıcaklık dağılımı ( $z = 115$ mm, $U_f = 2$ m/s).....	103
<b>Şekil 5.22.</b> Akışkanlaşma hava hızının $T_2$ sıcaklığına olan etkisi (Akış borusuna yakın bölgede, $r = 16.5$ mm ve $z = 85$ mm) .....	104
<b>Şekil 5.23.</b> Akışkanlaşma hava hızının $T_7$ sıcaklığına olan etkisi (Konik duvara yakın bölgede, $r = 52$ mm ve $z = 115$ mm) .....	104
<b>Şekil 5.24.</b> Taşkın hava hızının kuruma eğrilerine olan etkisi ( $U_0 = 6$ m/s, $U_f = 0$ m/s).....	106
<b>Şekil 5.25.</b> Taşkın hava hızının kuruma hızına etkisi ( $U_0 = 6$ m/s, $U_f = 0$ m/s) .....	107
<b>Şekil 5.26.</b> Taşkın hava hızının kuruma eğrilerine olan etkisi ( $U_0 = 6$ m/s, $U_f = 2$ m/s).....	108



<b>Şekil 5.27.</b> Taşkın hava hızının kurutma hızına etkisi ( $U_o = 6$ m/s, $U_f = 2$ m/s) .....	109
<b>Şekil 5.28.</b> Akışkanlaşma hava hızının kuruma eğrilerine olan etkisi ( $U_o = 6$ m/s) .....	111
<b>Şekil 5.29.</b> Akışkanlaşma hava hızının kuruma hızına etkisi ( $U_o = 6$ m/s).....	112
<b>Şekil 5.30.</b> Sisteme beslenen toplam hava miktarı sabit tutularak akışkanlaşma ve taşkınlaşma hava hızlarının kuruma eğrilerine olan etkisinin incelenmesi .....	113
<b>Şekil 5.31.</b> Sisteme beslenen toplam hava miktarı sabit tutularak akışkanlaşma ve taşkınlaşma hava hızlarının kuruma hızına olan etkisinin incelenmesi .....	114
<b>Şekil 5.32.</b> Kuruma süresinin operasyon koşullarına göre değişimi .....	115
<b>Şekil 5.33.</b> Enerji ihtiyacının işletim koşullarına göre değişimi .....	117
<b>Şekil A.1.</b> Taşkın-akışkan yataklı kurutucuda aktarım mekanizmaları .....	129
<b>Şekil A.2.</b> Konvektif kurutmada elde edilen karakteristik kuruma eğrileri .....	130
<b>Şekil A.3.</b> Kurutma sistemi .....	131

## Çizelgeler Listesi

Çizelge 2.1. Akışkan yatak kurutucuların parçacıklı malzeme uygulamasında diğer rakipleriyle karşılaştırılması (Law ve Mujumdar, 2007) .....	6
Çizelge 2.2. Literatürde yer alan taşkın-akışkan yatak çalışmalarının deneysel koşulları .....	10
Çizelge 3.1. Elek Tartım Sonuçları .....	14
Çizelge 3.2. Ortalama Parçacık Çapının ( $dp$ ) Hesaplanması .....	15
Çizelge 4.1. Üretimi yapılan akış borularının geometrik özellikleri .....	22
Çizelge 4.2. 30 ve 60 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatakların yanal alan özellikleri .....	26
Çizelge 4.3. Deney Koşulları .....	31
Çizelge 4.4. Deney Matrisi .....	31
Çizelge 4.5. Minimum taşkınlaşma hızı ( $U_{msd}$ ) sonuçları .....	34
Çizelge 4.6. Minimum kararlı taşkınlaşma hızı ( $U_{mssd}$ ) sonuçları .....	34
Çizelge 4.7. Tepe (peak) basınç düşümü sonuçları .....	35
Çizelge 4.8. Minimum kararlı taşkınlaşma basınç düşümü sonuçları .....	35
Çizelge 4.9. Minimum taşkınlaşma hızı ( $U_{msd}$ ) sonuçları .....	36
Çizelge 4.10. Minimum kararlı taşkınlaşma hızı ( $U_{mssd}$ ) sonuçları .....	36
Çizelge 4.11. Deney koşulları ( $\gamma = 60^\circ$ ) .....	38
Çizelge 4.12. $U_{ms,s}$ değerinin $U_f$ değeri ile değişimi, $\gamma = 60^\circ$ .....	41
Çizelge 4.13. Deney koşulları ( $\gamma = 30^\circ$ ) .....	43
Çizelge 4.14. $U_{ms,s}$ değerinin $U_f$ değeri ile değişimi, $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği. ....	46
Çizelge 4.15. $U_{ms,s}$ değerinin $U_f$ değeri ile değişimi, $\gamma = 30$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı. ....	48
Çizelge 4.16. Deney koşulları .....	64
Çizelge 4.17. Deney matrisi .....	64
Çizelge 4.18. Taşkın ve taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilmiş yatak-yüzey ısı transferi çalışmaları .....	70
Çizelge 4.19. Deney koşulları ( $\gamma = 30^\circ$ ) .....	71
Çizelge 4.20. Isı transferi deneylerinde kullanılan taşkınlaşma, $U_s$ ve akışkanlaşma, $U_f$ hava hızları. ....	72
Çizelge 4.21. Zeolit parçacıkları için elde edilen minimum akışkanlaşma hızı değerleri. ....	72
Çizelge 5.1. Kurutucunun geometrik ölçüleri .....	88
Çizelge 5.2. Kullanılan tuzların oda sıcaklığında (25 °C) kavanoz içinde oluşturdıkları denge nem değerleri .....	96
Çizelge 5.3. Sıcaklık ölçüm noktalarının akış borusunun merkezinden olan uzaklıkları .....	100
Çizelge 5.4. Kuruma süreleri ve enerji ihtiyaçları .....	116

## Simgeler ve Kısaltmalar Listesi

$A$	Isı Transferi Yüzey Alanı, $m^2$
$C_p$	Sabit Basınç Özgül Isısı, $J/kg.^{\circ}C$
$D_b$	Durağan Yatağın Üst Çapı, m
$D_c$	Yatak Çapı, m
$D_i$	Konik Taban Çapı, m
$D_o$	Gaz Giriş Çapı, m
$D_T$	Akış borusu iç çapı, m
$d_p$	Parçacık Çapı, mm
$L_H$	Kaldırma Yüksekliği, mm
$L_T$	Akış Borusu Boyu, mm
$H_b$	Statik Yatak Yüksekliği, m
$H_c$	Konik Kısımın Yüksekliği, m
$H_f$	Fıskiye Yüksekliği, m
$H_m$	Maksimum Taşkın Yatak Yüksekliği, m
$H_p$	Ölçüm Portunun Yatak Girişine Yüksekliği, m
$h$	Isı Transferi Katsayısı, $W/m^2.K$
$\dot{m}_g$	Sisteme Beslenen Toplam Hava Kütle Akış Debisi, $kg/s$
$M_s$	Yataktaki Nemli Malzemenin Kuru Kütlesi, kg
$P_v$	Kısmi Buhar Basıncı, Pa
$P_{ws}$	Doygun Buhar Basıncı, Pa
$\Delta P$	Basınç Farkı, Pa
$\Delta P_{max}$	Maksimum Basınç Farkı, Pa
$Q_{hava}$	Hava Debisi, $m^3/s$
$Q_T$	Toplam Gaz Debisi, $m^3/s$
$r$	Ölçüm Noktasının Radyal Konumu, m

$R$	Ölçüm Yüksekliğinin Yarıçapı, m
$T_s$	Isı Transferi Sondası Yüzey Sıcaklığı, °C
$T_\infty$	Yatak Sıcaklığı, °C
$T_k$	Kurutucu Giriş Hava Sıcaklığı, °C
$T_{ortam}$	Ortam Hava Sıcaklığı, °C
$U_{mf}$	Minimum Akışkanlaşma Hızı, m/s
$U_{ms}$	Minimum Taşkınlaşma Hızı, m/s
$U_{msd}$	Akış Borulu Taşkın Yatakta Minimum Taşkınlaşma Hızı, m/s
$U_{mssd}$	Akış Borulu Taşkın Yatakta Minimum Kararlı Taşkınlaşma Hızı, m/s
$U_o$	Taşkınlaşma Gaz Hızı, m/s ( $D_o$ çapına göre)
$U_f$	Akışkanlaştırma Gaz Hızı, m/s ( $D_o$ çapına göre)
$V_s$	Parçacıkların Gevşek Dolgulu Yapısında Sırasıyla %0'lık Karışım İçin Ölçülen Ortalama Voltaj Değeri
$V_0$	Parçacıkların Gevşek Dolgulu Yapısında Sırasıyla %100'lük Karışım İçin Ölçülen Ortalama Voltaj Değeri
$X_i$	Ağırlık Kesri
$X$	Yatak İçi Homojen Nem İçeriği, kg/kg
$Y_{out}$	Yatak Çıkış Hava Nemi, kg su buharı/kg kuru hava
$Y_{in}$	Yatak Giriş Hava Nemi, kg su buharı/kg kuru hava
$z$	Ölçüm Yüksekliği, m
$\rho_p$	Parçacık Yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>
$\beta$	Açıklık Oranı, %
$\gamma$	Konik Yatak Açısı, derece
$\varepsilon$	Yatak İçindeki Boşluk Oranı
$\varepsilon_s$	Yatak İçindeki Parçacık Konsantrasyonu
$\theta_i$	Boyut Faktörü
$\varphi$	Bağıl Nem

## Özet

Mikotoksinler, depolanan tahıllar ve kaba yemler üzerinde gelişen belirli küf formlarının toksik etkili metabolik yan ürünleridir. Mikotoksinler, son derece toksik, çoğu kansorejen, teratojen ve mutajen maddelerdir. Dolayısıyla, mikotoksinli ürünlerin doğrudan yenilmesi veya bu tip yem ile beslenen hayvanların et ve süt ürünlerinin yenilmesi sağlık açısından büyük risk oluşturmaktadır. Yemlerde bulunan mikotoksinlerin bazıları yem içerisinde salgılanırken, bazıları da yemler hayvanlar tarafından alındıktan sonra hayvan vücudunda salgılanırlar. Son yıllarda, yemlerde bulunan mikotoksinleri adsorbe edebilen ve hayvan sağlığını bozmayan doğal zeolitlerin yem katkısı olarak kullanılması gündeme gelmiştir. Zeolit mineralinin hayvan yemi katkı maddesi olarak güvenilir şekilde kullanılabilmesi için madenin çıkarıldıktan ve öğütüldükten sonra kurutma işlemine tabi tutularak nem değerinin yaş temelde maksimum %8 değerinde sabitlenmesi gerekmektedir. Ancak ülkemizde endüstriyel üretimi yapılan zeolit minerali yaz aylarında yüzey madenciliği ile çıkartılmaktadır ve çıkarılan madenin nem değeri %16 ile %24 arasında değişmektedir. Dolayısıyla bu projenin amacı, kısa kurutma süresi ve düşük enerji sarfiyatı ile yüksek verimde çalışacak, laboratuvar ölçekli, akış borulu bir taşkın-akışkan yatak kurutucu sistemi tasarlamak ve kurmaktır. Bu amaçla, öncelikle soğuk yatak hidrodinamik çalışmalar yapılmış, gaz-katı akış dinamiği açısından en uygun tasarım ve işletim koşulları bulunmuştur. Elde edilen bu koşullar için 30 derecelik konik açığa sahip, akış borulu bir taşkın-akışkan yatak kurutucu tasarlanıp, imal edilmiş ve kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamı itibarıyla literatürde bulunan akış borulu taşkın-akışkan yataklar konusundaki en kapsamlı çalışmalardan biri, mikron boyutunda parçacıklarla yapılan ise ilk kapsamlı çalışmadır. Elde edilen sonuçlar, zeolit parçacıklarının kurutulması için endüstriyel boyutta kurulacak olan sistemlerin tasarımına ışık tutacaktır. Ayrıca, tasarlanan sistem mikronize boyuttaki parçacıkların uygulamalarında gösterdiği üstünlüklerden dolayı sadece madencilik sektöründe değil, kimya ve ilaç sektörlerinde de kullanılabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Zeolitin kurutulması, mikronize parçacıklar, akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu, hidrodinamik

## **Abstract**

Myco-toxins are toxic byproducts of mold species which grows on stocked grains and feeds. They are highly toxic, carcinogenic, teratogen and mutagen substances. Thus, taking mycotoxic product directly or through meat and dairy products of the animals is too risky for health. Some of the bacteria in the feed are secreted inside the feed and some of them are secreted by the animals' organism after eating it. In recent years, zeolites which adsorb the toxic substances inside the feeds and have no bad effect on animal health have acquired popularity. Using zeolite in a reliable way as an animal feed additive requires drying it after mining and milling and it is necessary to stabilize its moisture content at about 8% (wet basis). However, in our country, zeolite is mined through surface mining in summer months and the mined ores' moisture content is in the range of 16-24%. Therefore, the objective of this study is to design and construct a laboratory scale draft tube spout-fluid bed dryer that will operate with low energy consumption and high efficiency. To achieve this objective, firstly, hydrodynamic studies were carried out in cold systems and the optimum design and operating parameters were determined. In the light of these findings, a spout-fluid bed dryer having a 30 degrees conical angle and a draft tube were designed, constructed and used in drying tests. This study is one of the most comprehensive studies on spout-fluid beds with draft tube in the literature and it is the first one where micronized particles are used. The findings of this study will be used in the design of industrial scale spout-fluid bed dryers. Furthermore, due to the superiority displayed by the system during operation with fine particles, it can also be used in different applications of chemical and pharmaceutical industries.

**Keywords:** Drying zeolite, fine particles, draft-tube spout-fluid bed dryer, hydrodynamics

## 1. GİRİŞ

Mikotoksinler, depolanan tahıllar, kaba yemler ve bazı çayır otları üzerinde gelişme gösteren belirli küf formlarının toksik etkili metabolik yan ürünleridir. Mikotoksinler, son derece toksik, çoğu kansorejen, teratojen (fetusun normal gelişimini engelleyen ve çeşitli anomalilere yol açan) ve mutajen (DNA ve RNA'ların mutasyona uğramasına sebep olan) maddelerdir. Yemlerde bulunan mikotoksinlerin bazıları yem içerisinde salgılanırken, bazıları da yemler hayvanlar tarafından alındıktan sonra hayvan vücudunda salgılanırlar (Basmacıoğlu ve Ergül, 2003). Dolayısıyla, mikotoksinli ürünlerin doğrudan yenilmesi veya bu tip yem ile beslenen hayvanların et ve süt ürünlerinin yenilmesi sağlık açısından büyük risk oluşturmaktadır. Son yıllarda, yemlerde bulunan mikotoksinleri adsorbe edebilen ve hayvan sağlığını bozmayan doğal zeolitlerin yem katkısı olarak kullanılması gündeme gelmiştir (Peraica vd.,2002; Eğrikılıç, 2009; Sabuncuoğlu vd., 2008).

Zeolitler kristal yapıda hidrasyona uğramış alüminyum silikatlardır. Gözenekli yapısı ve yüksek iyon değiştirme kapasitesi sayesinde birçok çeşit gazı ve kokuyu; suyu ve nemi; petrokimyasal maddeleri, düşük düzeyde radyoaktif elementleri, amonyumu, toksinleri, ağır metalleri ve pek çok solüsyonu tutma ve soğurma özelliğine sahiptir. Bu özelliklerinden ötürü tarım, hayvancılık, arıtma gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Türkiye’de detaylı rezerv etüdü yapılmış tek zeolit sahası Manisa-Gördes civarındaki saha olup bu sahada 18 milyon ton görünür zeolit rezervi ve 20 milyon ton zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise Türkiye’nin en önemli zeolit yatakları mevcut olup yaklaşık 500 milyon ton rezerv olduğu tahmin edilmektedir. Diğer bölgelerde detaylı bir çalışma yapılmamış olup, ülkemiz genelinde toplam rezervin 50 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir (Yurtoğlu, 2007).

Doğal zeolit klinoptilolit mineralinin hayvancılıkta yem katkı maddesi olarak kullanımına Türkiye’de Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Organik Tarımın Esasları ve Uygulanmasına İlişkin Yönetmeliğin 10 Haziran 2005 tarihli 25841 sayılı kanunun Ek7/D.6 maddesine göre; Avrupa Birliği’nde ise Avrupa Yem Komisyonu tarafından 16 Haziran 1999 yılı 70/524/EEC direktifi ile izin verilmiştir.

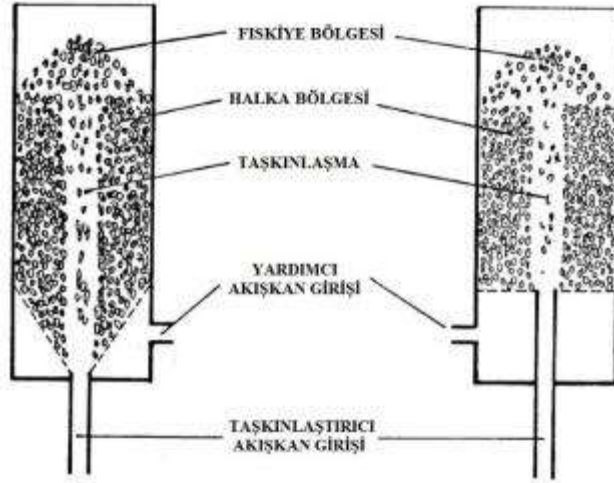
Zeolit mineralinin hayvan yemi katkı maddesi olarak güvenilir şekilde kullanılabilmesi için madenin çıkarıldıktan ve öğütüldükten sonra kurutma işlemine tabi tutularak nem değerinin yaş temelinde maksimum % 8 değerinde sabitlenmesi gerekmektedir. Ancak ülkemizde Manisa’nın Gördes ilçesinde endüstriyel üretimi yapılan zeolit minerali yaz aylarında yüzey

madenciliği ile çıkartılmaktadır ve çıkarılan madenin ise nem değeri % 16 ile % 24 arasında değişmektedir.

Kurutma işlemi temelde sıcak gaz ile parçacık temasının yüksek olmasına bağlıdır. Günümüzde toz haldeki minerallerin kurutulmasında genel olarak döner fırınlar kullanılmaktadır. Ancak bu tip fırınlarda kurutma işlemi için çok yüksek sıcaklıklarda ve hızda havaya ihtiyaç duyulmakta ve elde edilen ürün yeteri kadar homojen olmamaktadır [6]. Akışkan yatak teknolojisi döner fırınlarda görülen bu dezavantajları ortadan kaldırmaktadır. 1920'lerde keşfedilen akışkan yataklar 1 mm çapından daha küçük parçacık kurutma uygulamalarında oldukça etkilidir (Law ve Mujumdar, 2007). Akışkan yatak kurutucuların çalışma prensibi, yatağa alt kısımdan bir dağıtıcı yardımıyla beslenen sıcak havanın, yatak içindeki kurutulmak istenen taneciklerin arasından geçerek ve onları askıda tutarak eş dağılımlı ve etkili bir kurutma sağlamasıdır. 1 mm'den büyük tanecikler söz konusu olduğunda ise akışkan yataklar bu tanecikleri akışkanlaştırmadaki verimliliklerini yitirmektedirler. Bunun nedeni büyük parçacıkları akışkanlaştırmak için gerekli akışkan debisinin çok yüksek olmasıdır. 1950'lerde keşfedilen taşkın yataklar genelde çapı 1 mm'den büyük parçacıkların uygulamaları için kullanılmaktadır. Yatağın altındaki konik bölgenin merkezinden gönderilen hava merkez boyunca yatağın yüzeyine kadar tanecikleri sürükler ve tanecikler yüzeye vardığında yağmur gibi yanlara düşerek bir fıskiye görünümünde hareket ederler. Yan kısma düşen tanecikler yavaş bir şekilde tekrar konik bölgenin alt kısmına doğru hareket ederler ve tekrar hava tarafından taşınarak yüzeye çıkarlar. Bu devirsel hareket sayesinde taşkın yataklar büyük tanecikli malzemelerin uygulamalarında en etkili yöntemdir (He vd., 1992; Epstein ve Grace, 2011).

Taşkın yataklarda parçacıkların devirsel hareketini sağlamak için sisteme beslenen hava tüm yatağı kaldırmamakta ve sadece orta kısımdan tanecikleri yüzeye taşıyarak fıskiye oluşturduğu için, akışkan yataklara kıyasla çok daha az hava debisine ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, havayı ısıtmak için daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Ancak toz haldeki tanecikler taşkın yataklarda düzgün bir şekilde taşkınlaştıramamaktadır. Bu sebeple taşkın yatak tasarımının üzerinde bazı değişiklikler yapmak gerekmektedir. Homojen bir kurutma işlemini en uygun işletim koşullarında gerçekleştirmek için akışkan ve taşkın yatakların avantajlarını birleştiren taşkın-akışkan yatak kurutucu tipi en uygun sistem olarak öngörülmektedir. Taşkın-akışkan yataklar, taşkın yataklar üzerinde değişiklikler yapılarak keşfedilen, akışkan yatak teknolojisindeki en yeni yöntem olarak bilinmektedir (Chatterjee, 1970). **Şekil 1.1'**de dağıtıcıları konik ve düz tabanlı olan taşkın-akışkan yatakların şekilleri gösterilmektedir.





**Şekil 1.1.** Dağıtıcıları konik ve düz tabanlı olan taşkın-akışkan yataklar (Sutanto, 1983)

Bu yöntemde taşkın yataklara benzer olarak alt konik bölgenin merkezinden hava beslenirken yan kısımlardan da akışkan yataklara benzer olarak delikli bir dağıtıcı yardımıyla hava beslenmektedir. Böylelikle taşkın yataklarda havayla çok az temas edebilen merkezle duvar arasındaki halka bölgesi artık havayla daha iyi temas edebilmekte ve parçacıkların duvar bölgesine yapışması engellenmektedir (Sutanto, 1983; Chandnani, 1984; Cunha vd., 2006; Cunha vd., 2000; Osorio-Reville vd., 2004a).

Karma yapısından dolayı akışkan ve taşkın yatakların avantajlarını taşıyan taşkın-akışkan yataklar, taşkın yataklarda görülen taneciklerin topaklanması, yatağın duvar ve alt kısımlarındaki hareketsizlik ve yapışma, ölü bölgelerin oluşumu gibi dezavantajları ortadan kaldırmaktadır (Epstein ve Grace, 2011). Konik bölgenin yanlarından beslenen hava akımı küçük ve birbirine yapışma eğilimi gösteren taneciklerin de (Geldart Grup A ve C) bu sistemlerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Geldart, 1973). Ayrıca akış borusunun (draft tube) yatak içinde kullanılması bahsedilen küçük parçacıkların uygulamalarına olanak sağlamaktadır (Altzibar vd., 2008). Daha önce doğal zeolit 'klinoptilolit' mineralinin herhangi bir uygulamasında taşkın-akışkan yatak teknolojisi kullanılmamış ve parçacık boyutu da göz önüne alındığında, mevcut parçacık çapına yakın bir değer dahi denenmemiştir. Akış borulu taşkın-akışkan yatakta günümüze kadar kullanılan en düşük parçacık boyutu yaklaşık 1 mm'dir (Xu vd., 2009).

Projenin temel amacı, mikron boyutundaki nem oranı yüksek parçacıkların en verimli ve ekonomik biçimde kurutulmasını sağlamak için bir akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu sistemi tasarlamak ve kurmaktır. Akış borulu taşkın-akışkan yatak sisteminin zeolit kurutulması için kullanılması literatürde ve endüstride **henüz bulunmayan** bir uygulamadır.

## 1.1 Raporun Düzeni ve İçeriği

Rapor 2 ana bölümden oluşmaktadır:

- kurutucu tasarımı öncesinde soğuk taşkın ve taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilen hidrodinamik çalışmalar,
- kurutma deneyleri.

4. bölümde soğuk sistemlerde yapılan hidrodinamik çalışmalar verilmektedir. Bu bölümde kullanılan sistemler hakkında bilgi, basınç düşümleri, minimum taşkınlaşma hızları, hızlı kamera ölçümleri, optik sonda sistemiyle gerçekleştirilen parçacık konsantrasyonu ölçümleri ve ısı transferi ölçümleri anlatılmaktadır. Bu bölümdeki sonuçların bir kısmı 'Hydrodynamic Behavior of Fine Zeolite Particles in Spout-Fluid Beds With Draft Tube' başlığıyla 19-22 Ekim 2015 tarihinde Kanada'da yapılmış olan 64. *Kanada Kimya Mühendisliği Kongresi*'nde sözlü olarak sunulmuştur. Bu bölümde elde edilen ısı transferi ölçümlerinin sonuçları ise 22-26 Mayıs 2016 tarihinde Kanada'da gerçekleştirilecek olan Fluidization XV konferansında sunulması planlanmaktadır. Bu konferansta sunulan tebliğler SCI listesinde yer alan 'Canadian Journal of Chemical Engineering' dergisinin özel sayısında basılacaktır.

Raporun 5. bölümünde kurutma sistemi hakkında bilgi ve kurutma deney sonuçları verilmektedir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar 'Drying Technology' dergisine sunulmak üzere derlenme aşamasındadır.

Bu 2 ana bölüme ek olarak 2. bölümde genel bir literatür özeti, 3. bölümde kullanılan doğal zeolit hakkında bilgi verilmektedir. 6. bölümde ise genel sonuçlar paylaşılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1 Doğal Zeolitin Kurutulması İçin Uygulanabilir Teknoloji Seçimi

Zeolit minerallerinin gözenek boyutları moleküler büyüklüktedir. Bu nedenle su molekülleri az miktarda bir ısıtma ile dahi zeolitin yapısından kolayca uzaklaşabilir ve sonrasında tekrar adsorbe olabilir (Mumpton, 1999). Doğal zeolitin kuruma karakteristiği ile ilgili literatürde yer alan bilgi; nem içeriğinin belirlenmesi amacıyla yapılan termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları ile kısıtlı olup bu sonuçlara göre yüzey nemi dışındaki zayıf bağlı ve güçlü bağlı su miktarının toplamda % 8-12 arasında değiştiği yönündedir. Doğal zeolit klinoptilolit TGA içinde ısıtılması esnasında dış kısmındaki nemin 85°C'ye kadar hızlı bir şekilde tamamen kaybolduğu bilinmektedir (Yetgin, 2006). Burdan yola çıkılarak, yaklaşık %20 nem içeriğine sahip toz haldeki klinoptilolit mineralinin projede kullanılacak üstün özellikli sistem içerisinde gaz-katı teması çok daha iyi seviyelerde tutularak, daha düşük sıcaklık ve hava hızlarında %8 neme kadar ekonomik ve verimli bir şekilde kurutulabileceği açıkça görülmektedir.

Kurutma mekanizmasında bir katının bünyesindeki dış nemi uzaklaştırmak için iki yöntem vardır. Bunlardan bir tanesi kaynama noktasının üzerinde buharlaştırma yapmak, diğeri ise kaynama noktası altında taşınım ile buharlaştırma yapmaktır. Daha düşük sıcaklık kullanılan ikinci yöntemde nem, kurutma havasına taşınır ve sonrasında uzaklaştırılır. Bu durumda, katıdaki nemin doymuş buhar basıncı atmosferik basınçtan daha düşüktür. Endüstride toz haldeki malzemelerin kurutulmasında kullanılan öncelikli teknikler, **Çizelge 2.1**'de de özetlendiği gibi flaş kurutma, akışkan yataklı kurutma, döner kurutucuda kurutma ve tepsi tipi kurutucuda kurutmadır. Bu bahsedilen yöntemlerde toz haldeki malzemeler konveksiyon (taşınım) ile kurutulmaktadır. Flaş kurutucularda 1-10 saniye arasında olan kurutma süresi, tepsi tipi kurutucularda 1-6 saat ve diğeri bahsedilen kurutucu tiplerinde 10-60 dakika arasındadır. Kurutma süresi olarak avantajlı görülen flaş tipi kurutucularda kısa süreli kurutma yüzünden hava giriş sıcaklığı 600°C civarında olmalıdır ve bu durum çok yüksek enerji sarfiyatı ve işletim gideri demektir. Diğeri bir yandan, kurutma süresi 10-60 dakika arasında olan akışkan yatakları incelemek gerekirse, işletimi en ekonomik ve elde edilen ürünlerin kalitesi en yüksek sistem olduğu görülmektedir. Genellikle 50-1000 mikron boyuttaki parçacıklar için kullanılan akışkan yatak kurutucular, tanecikleri yatak içerisinde kurutma havası ile askıda tutarlar ve bu sayede iyi tanecik karışımı, homojen ürün eldesi, yüksek hızda enerji ve kütle aktarımı, kolay malzeme taşınımı gibi avantajları ile diğeri kurutucu tiplerine büyük üstünlük sağlarlar. Ayrıca toz malzemelerin kurutulmasında akışkan yataklar 4000-6000 kJ/kg buharlaştırılan su

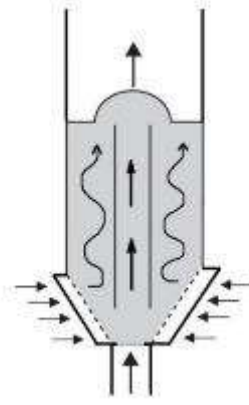
değerinde bir enerji harcarken, az enerji harcamada kendisine en yakın rakibi olan döner kurutucular 4600-9200 kJ/kg buharlaştırılan su değerinde enerji harcamaktadır. Tüm bu kıyaslamalar göz önüne alındığında akışkan yatak teknolojisinin toz malzemenin kurutulmasında en verimli ve başarılı teknik olduğu görülmektedir (Law ve Mujumdar, 2007).

**Çizelge 2.1.** Akışkan yatak kurutucuların parçacıklı malzeme uygulamasında diğer rakipleriyle karşılaştırılması (Law ve Mujumdar, 2007)

Kıstas	Döner Kurutucu	Flaş Kurutucu	Taşımalı Kurutucu	Akışkan Yatak Kurutucular
Parçacık boyutu	Geniş aralık	İnce tanecikler	500 µm-10mm	100-2000 µm
Parçacık boyutu dağılımı	Esnek	Sınırlı	Esnek	Sınırlı
Kurutma süresi	60dk'ya kadar	10-30 saniye	120dk'ya kadar	60 dk'ya kadar
Kapladığı alan	Büyük	Çok uzun	Büyük	Küçük
Devrilme oranı	Büyük	Küçük	Küçük	Küçük
Aşınma	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Güç harcama	Yüksek	Düşük	Düşük	Orta
Bakım-onarım	Yüksek	Orta	Orta	Orta
Enerji verimi	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
Kontrol kolaylığı	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek
Kapasite	Yüksek	Orta	Orta	Orta

Akışkan yatakların özellikleri göz önüne alındığında tek zayıf noktasının yataktaki yüksek basınç düşümü ve bundan dolayı kullanılan yüksek debideki hava olduğu görülmektedir. Kurutma işleminde sisteme beslenen fazla miktardaki hava, bu havayı ısıtmak için fazla miktarda enerji anlamına gelmektedir. Akışkan yatak teknolojisinin bir üyesi olan taşkın yataklarda bu sorun en aza indirilmektedir. Taşkın yatakta tek açıklıktan giren hava tüm yatağı kaldırmamakta ve sadece merkezde belli bir çaptaki bölgeyi yüzeye taşıyıp devrimsel hareket sağlayarak kurutma işlemini gerçekleştirmektedir. Ekonomik olarak çok tasarruflu bir kurutucu sistemi olan taşkın yatakların tek dezavantajı ise uygulamada sadece Geldart D Gurubu ( $d_p > 1 \text{ mm}$ ) parçacıklarla kullanılmasıdır. Bu noktada iki ayrı sistemin de eksikliklerini ortadan kaldıran ve uygulanabilen tanecik boyutu aralığını genişletebilen karma bir yatak türü olan *taşkın-akışkan yataklar* en uygun sistem olarak öngörülmektedir.

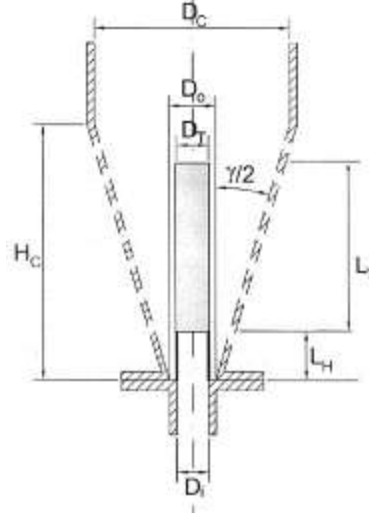
Günümüzde kurutma, öğütme, gazlı temizleme, katıların ısıtılması-soğutulması, karıştırılması, piroliz, kömürün gazlaştırılması ve yakılması gibi uygulamalarda kullanılmakta olan (Sutanto vd., 1985; Vukovic vd., 1984; He, 1990; Pianarosa vd., 2000) taşkın-akışkan yataklarda halka bölgesine yardımcı hava akımı beslenerek daha iyi katı-akışkan teması ve karışımı sağlanmaktadır (Bakınız **Şekil 2.1**). Bu yataklarda, taşkın yataklarda görülen muhtemel sorunlardan; parçacık topaklanması, ölü bölgelerin oluşması, parçacıkların duvar kısmına veya kolonun alt kısmına yapışıp kalması durumları büyük ölçüde azaltılmaktadır (Epstein ve Grace, 2011). Ayrıca taşkın yatakların çalışabildiği tanecik sınıfından daha geniş bir parçacık sınıfıyla çalışabilmekte ve istenmeyen çökmeli ve parçalı akışkanlaşmaya sebep olmamaktadır. Bu projenin konusu olan kurutma işlemi günümüze kadar çapları 0.09-0.29 m arasındaki taşkın-akışkan yataklarda denenmiştir (Shuhama vd., 2003; Osorio-Revilla vd., 2004b; Zielinska ve Markowski, 2007; Povrenovic ve Dimitrijevic-Brankovic, 2002). Kurutma malzemesi olarak da genelde 1 mm'nin üzerindeki parçacıklar kullanılmıştır. Parçacık büyüklüğü bakımından şu ana kadar en küçük boyutta yaklaşık 0.4 mm ortalama çapındaki kum parçacıkları akış borulu bir taşkın yatakta kullanılmıştır (Altzibar vd., 2008). Bu çalışmalarda hava giriş sıcaklığı artırıldıkça kurutma hızının arttığı, dolayısıyla da kurutma süresinin kısaldığı görülmüştür (Cunha vd., 2006; Marmo, 2007; Zielinska ve Markowski, 2010). Ayrıca hidrodinamik bir çalışmada 98 µm'a kadar ince tanecikler (PVC tozları) denenmiş fakat yapışma ve taşkınlaşmama gibi sebeplerle sadece dar bir alanda tanecik hareketi gözlemlenmiş, taşkınlaştırılabilen bölge ise akış borusu kullanılmadığından sadece bir kaç milimetre çapında olmuştur (Chandnani, 1984). Akış borulu taşkın-akışkan yataklar endüstride kullanılabilen çok etkili parçacık-akışkan sistemleridir. **Şekil 2.1**'de tipik bir akış borulu taşkın-akışkan yatağın çizimi verilmektedir. Akış borusunun akışkanın yatakta kalma süresini kontrol etmeye ve taneciklerin devirsel hareket dağılımını artırmaya katkısı çok büyüktür. Taşkın akışkan yatak sistemine akış borusu eklendiğinde maksimum taşkınlaştırılabilen yatak yüksekliği sınırı tamamen ortadan kalkmaktadır. Bunun yanında basınç düşmesi azalmakta ve taşkınlaştırma için gerekli olan minimum gaz debisi değerinde düşüş görülmektedir. **Literatürde, akış borulu taşkın-akışkan yataklarda mikronize parçacıklarla gerçekleştirilen herhangi bir çalışma yoktur.** Bu tip yataklarda büyük parçacıkların kullanıldığı çalışmalar dahi çok yetersizdir.



**Şekil 2.1.** Akış borulu taşkın-akışkan yatak

## 2.2. Taşkın-Akışkan Yataklar ve Geometrik Parametreleri

Taşkın yataklarda gaz, yatak merkezinden dik bir şekilde yeterince yüksek bir debi ile enjekte edildiğinde yatak içindeki katı parçacıkların merkezinde bir boşluk oluşur ve buradaki parçacıklar yükselerek tepede bir fıskiye oluşturur. Böylece yatak içinde merkezde seyrek, merkezden duvara kadar olan halka bölgesinde yoğun olmak üzere iki kısım meydana gelir. Bu kısımlardan merkezde ve seyrek olan bölge *taşkınlaşma bölgesi*, duvara kadar ki yoğun kısım ise *halka bölgesidir*. Taşkın yatak içinde parçacıklar sürekli döngü halindedir. Yatağa dik giren gaz ile yükselen parçacıklar, oluşan fıskiye yatak içine ve genellikle halka bölgesine düşerler. Parçacıklar duvar boyunca aşağı hareket ederler veya herhangi bir seviyede yeniden taşkın bölgeye geçip fıskiye katılırlar. Taşkın-akışkan yataklarda ise, taşkın yataklara benzer olarak alt konik bölgenin merkezinden hava beslenirken yan kısımlardan da akışkan yataklara benzer olarak delikli bir dağıtıcı yardımıyla hava beslenmektedir. Böylelikle taşkın yataklarda havayla çok az temas edebilen merkezle duvar arasındaki halka bölgesi artık havayla daha iyi temas edebilmekte ve parçacıkların duvar bölgesine yapışması engellenmektedir. Bu sistemlerin kararlı bir taşkınlaşma-akışkanlaşma rejimi içerisinde çalışabilmesi için geometrik parametrelerinin çok hassas bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir. Taşkın-akışkan yatağın hidrodinamiğini belirleyen temel faktörler gaz (yoğunluk, viskozite, sıcaklık) ve parçacık özellikleri (yoğunluk, büyüklük, şekil) ile **Şekil 2.2**'de verilen yatak geometrik parametreleridir (Altzibar vd., 2011).



**Şekil 2.2.** Akış borulu taşkın-akışkan yataklarda yatak hidrodinamiğini etkileyen geometrik tasarım parametreleri:  $D_c$ : yatak çapı,  $H_c$ : konik kısım yüksekliği,  $D_o$ : yatak taban çapı,  $D_i$ : gaz giriş çapı,  $L_H$ : kaldırma yüksekliği,  $L_T$ : akış borusu uzunluğu,  $D_T$ : akış borusu iç çapı,  $\gamma$ : konik kısım açısı (Altzibar vd., 2011).

Bu proje kapsamında kurulan sistemin tasarımı için öncelikle literatürde bulunan taşkın-akışkan yataklarda yapılan tüm çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmalar **Çizelge 2.**'de özetlenmektedir. Bu değerlerin yanı sıra, San Jose ve diğ. (San Jose vd., 2007) kararlı bir taşkınlaşma elde edilebilmesi için  $D_T/D_i$  oranının en düşük 1 olmasının gerektiğini belirtmiştir. Gaz giriş çapının akış borusu çapından büyük olması gazın taşkın bölge dışına çıkıp akış borusu yanlarından da ilerlemesine ve kararlı taşkınlaşma davranışını bozmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bunlara ek olarak, yatağın konik bölge açısı yatak hidrodinamiğini etkileyen çok önemli bir parametredir. Sadece taşkın yatak hidrodinamiği göz önüne alındığında, konik bölge açısının alt sınırının  $28^\circ$ , üst sınırının ise  $60^\circ$  olması gerektiğine dikkat çekilmiştir (Epstein ve Grace, 2011). Açı değeri  $28^\circ$ 'in altına düştüğü zaman taşkınlaşma kararlılığının kaçınılmaz şekilde bozulduğu,  $60^\circ$ 'nin üzerine çıktığı zaman ise parçacıkların yatak içindeki devirsel hareket hızının oldukça düştüğü belirtilmiştir. Buradan yola çıkılarak, yatağa doldurulacak parçacık miktarı, oluşabilecek ölü bölgeler ve devirsel hareket hızının yüksek olması gerektiği göz önünde bulundurularak, bahsedilen sınırlar içinde uygun bir konik bölge açısı seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu çalışmalar ve **Çizelge 2.2**'de verilen çalışmalar incelendiğinde, literatürde yer alan taşkın-akışkan yataklarda yapılan çalışmaların hepsinde büyük parçacıkların kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle, tasarım sırasında, incelenen parametreler ve bu parametrelerin birbirine olan oranları sadece ışık tutması amacıyla kullanılabilmiştir. Literatürdeki bu boşluk aynı zamanda, iyi bir tasarım için ön tasarım ve ön denemelerin gerekliliğini ortaya koymuştur.

**Çizelge 2.2.** Literatürde yer alan taşkın-akışkan yatak çalışmalarının deneysel koşulları

Ref.	D <sub>c</sub> (m)	D <sub>i</sub> (m)	γ(°)	H <sub>b</sub> (m)	D <sub>o'</sub> (m)	β (%)	D <sub>T</sub> (m)	L <sub>T</sub> (m)	L <sub>H</sub> (m)	d <sub>P</sub> (μm)	ρ <sub>P</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ε
Sutanto vd. (1985)	0.152	0.019	60	0.60	0.003	0.152	-	-	-	2900-3900	930-1040	0.38-0.43
Zhang and Tang (2006)	0.125	0.018	60	0.18-0.29	0.002	NS	-	-	-	1060-3240	952-2940	NS.
Pianarosa vd. (2000)	0.152	0.019	60	0.28	0.003	0.635	-	-	-	1330-2530	2463-2493	0.41-0.42
Sutanto (1983)	0.152	0.019	60	0.125	0.003	0.631	-	-	-	2850-3940	930-1040	0.38-0.43
Zhong vd. (2008)	0.100	0.010	60	0.1-0.3	0.001		-	-	-	1600-2300	1330	0.40-0.42
Ishikura vd. (2011)	0.100	0.012	60	0.3	0.001		0.014	0.3	0.02-0.04	880-1350	2480-2670	0.38-0.42
Kfuri ve Freitas (2007)	0.145	0.035	45	NS	NS	NS	-	-	-	8000 (Tablet)	NS	NS
Marmo (2006)	0.290	0.032	62	0.43	0.001	0.034	0.04	0.043	0.05	2000-4000	570 (Bulk)	NS
Pianarosa (1996)	0.152	0.025	60	0.28	0.003	0.614	-	-	-	1330-2530	1450-1460	0.41-0.42
Osorio-Revilla vd. (2004a)	0.143	0.0235	60	0.214	*	*	0.035 2	0.3	0.04	2290	1164	0.39
Xiao vd. (2002)	0.200	0.025, 0.032	60	0.713	0.001	0.074	0.042	1	0.063, 0.143	2067	2450	NS
Muir vd. (1989)	0.200	0.027	60	0.6	0.0009	0.085	0.023, 0.04	0.6	0.06, 0.08, 0.10, 0.14	1020	2560	NS
Xu vd. (2009)	0.120	0.015, 0.020, 0.025	60	0.08, 0.15, 0.18	0.002	0.729	0.025	0.2	NS	1212	1360	NS
Xu vd. (2010)	0.150	0.043	60	0.3	0.002	0.161	-	-	-	253,461	1206,1801	NS



**Çizelge 2.2.** Literatürde yer alan taşkın-akışkan yatak çalışmalarının deneysel koşulları (devam)

Ref.	$D_c/D_i$	$D_i/d_p$	$D_o'/d_p$	$H_b/D_i$	$L_T/D_T$	$D_T/d_p$
Sutanto vd. (1985)	8	4.82-6.67	0.76-1.05	6.58	-	-
Zhang and Tang (2006)	6.944	16.98-5.56	0.62-1.89	10-16	-	-
Pianarosa vd. (2000)	8	14.29-7.51	1.19-2.26	14.74	-	-
Sutanto (1983)	8	4.82-6.67	0.76-1.05	6.58	-	-
Zhong vd. (2008)	10	4.35-6.25	0.44-0.63	10-30	-	-
Ishikura vd. (2011)	8.3	13.6-8.89	0.74-1.14	25	21.43	9.15-15
Kfuri ve Freitas (2007)	4.143	4.375	NS	NS	-	-
Marmo (2006)	9.063	16-8	0.25-0.5	13.44	1.08	10-20
Pianarosa (1996)	6.08	18.8-9.88	1.19-2.26	11.2	-	-
Osorio-Revilla vd. (2004a)	6.09	10.262	*	9.11	8.52	15.37
Xiao vd. (2002)	6.25,8	12.1-15.48	0.48	28.5-22.3	23.81	20.32
Muir vd. (1989)	7.4	26.47	0.88	22.2	15- 26.09	22.55
Xu vd. (2009)	8,6,4,8	12.376, 16.502, 20.627	1.65	5.3, 7.5, 7.2	8	20.627
Xu vd. (2010)	3.49	20	7.91,4.34	6.98	-	-

NS: Belirtilmemiş

\*: Delikli

### 3. DOĞAL ZEOLİT KLİNOPTİLOLİT

Zeolitler kristal yapıda hidrasyona uğramış alüminyum silikatlardır. Gözenekli yapısı ve yüksek iyon değiştirme kapasitesi sayesinde birçok çeşit gazı ve kokuyu; suyu ve nemi; petrokimyasal maddeleri, düşük düzeyde radyoaktif elementleri, amonyumu, toksinleri, ağır metalleri ve pek çok solüsyonu tutma ve soğurma özelliğine sahiptir. Bu özelliklerinden ötürü tarım, hayvancılık, arıtma gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Ancak ülkemizde Manisa'nın Gördes ilçesinde endüstriyel üretimi yapılan zeolit minerali yaz aylarında yüzey madenciliği ile çıkartılmaktadır ve çıkarılan madenin nem değeri % 16 ile % 24 arasında değişmektedir. Ancak doğal zeolit klinoptilolitin hayvan yemi katkı maddesi olarak güvenilir şekilde kullanılabilmesi için madenin çıkarıldıktan ve öğütüldükten sonra kurutma işlemine tabi tutularak nem değerinin yaş temelinde maksimum % 8 değerinde sabitlenmesi gerekmektedir.

Bu projenin amacı, mikron boyutundaki nem oranı yüksek klinoptilolit parçacıklarını en verimli ve ekonomik biçimde kurutulmasını sağlamak için bir akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu sistemi tasarlamak ve kurmaktır. Bu çalışmada kullanılan doğal zeolit, klinoptilolit parçacıkları Manisa'nın Gördes ilçesinde yer alan *ROTA Madencilik A.Ş.* tarafından sağlanmıştır. Hidrodinamik ve kurutma çalışmalarına başlanmadan önce bu parçacıkların detaylı karakterizasyonunun yapılması şarttır.

#### 3.1 Klinoptilolitin Saflığının Tespit Edilmesi

Toz halindeki zeolit numunesine ait X ışını kırınım şeması **Şekil 3.1**'de verilmiştir. Şekilde yer alan piklerin karakteristik klinoptilolit pikleri olduğu belirlenmiştir.



RIR yöntemi kullanılarak yapılan ve Şekil 8'de sonucu verilen analizde görülen kristal safsızlıklar ihmal edilir düzeyde görülmüş ve Klinoptilolit içeriği tekrar % 100 mertebesinde çıkmıştır.

### 3.2 Gerçek ve Yığın Yoğunluğunun Tespit Edilmesi

Toz haldeki klinoptilolit numunesinin parçacık yoğunluğunu bulabilmek amacıyla öncelikle helyum piknometresi kullanılarak gerçek yoğunluk değeri  $2140 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Daha sonra Cıva porozimetresi kullanılarak pelet haline getirilen malzemenin atmosferik basınç altındaki yığın yoğunluğu  $680 \text{ kg/m}^3$  olarak bulunmuştur.

### 3.3 Parçacık Boyutunun Tespit Edilmesi

Yatak malzemesi olarak kullanılan klinoptilolit parçacıklarının ortalama çapını bulabilmek için proje kapsamında alımı gerçekleştirilen Fritsch marka A3 Pro model titreşimli elek cihazı kullanılmıştır. Parçacık boyut dağılımı geniş olan  $700 \mu\text{m}$  altındaki malzemeden yaklaşık 600 g miktarında bir numune kullanılmıştır. Numune, 30 dakika, 2 mm titreşim genliğinde titreştirilerek elekten geçirilmiştir. Elek tartım sonuçları **Çizelge 3.1**'de verilmektedir. Ortalama parçacık çapı, **Çizelge 3.2**'den görülebileceği gibi, eş dağılımlı olmayan katıların boyut ölçümü yöntemi (Kunii ve Levenspiel, 1991) ile  $276 \mu\text{m}$  olarak tayin edilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Elek Tartım Sonuçları

Malzemenin boyut olarak üst sınırı ( $\mu\text{m}$ )	Kümülatif Malzeme Ağırlığı (g)
32	0.4
90	3.7
150	17.3
250	234.6
560	582.3
700	597.2

### Çizelge 3.2. Ortalama Parçacık Çapının ( $\overline{d_p}$ ) Hesaplanması

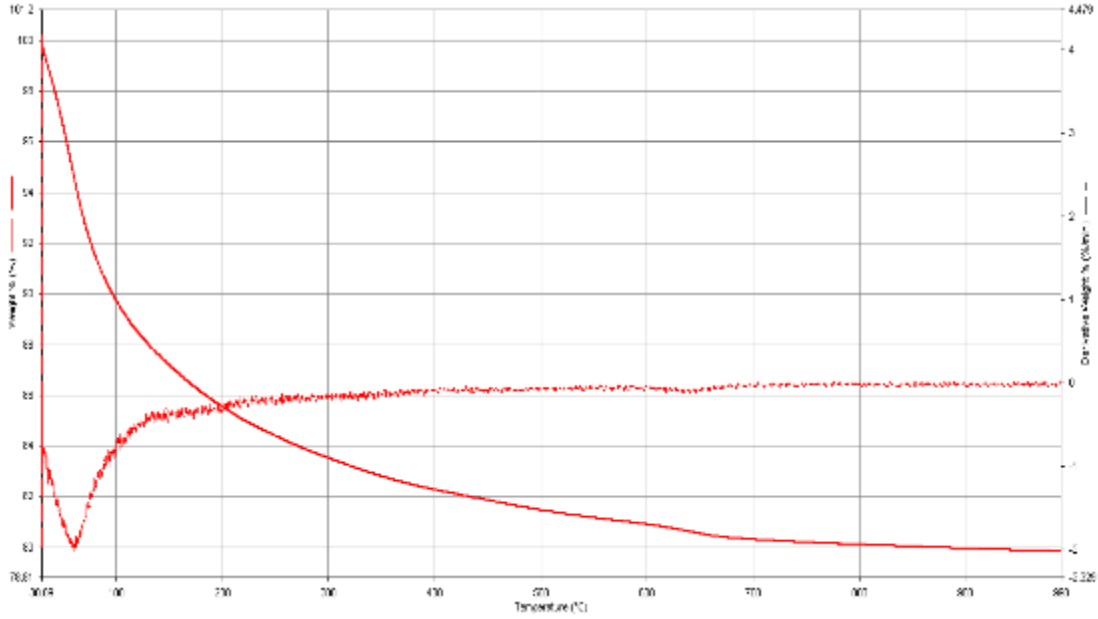
Çap Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	Ortalama Çap ( $\mu\text{m}$ )	Ağırlık Kesri ( $x_i$ )	Boyut Faktörü ( $\theta_i$ )
0-32	16	$x_1 = (0.4 - 0) / 597.2$	$x_1/16$
32-90	61	$x_2 = (3.7 - 0.4) / 597.2$	$x_2/61$
90-150	120	$x_3 = (17.3 - 3.4) / 597.2$	$x_3/120$
150-250	200	$x_4 = (234.6 - 17.3) / 597.2$	$x_4/200$
250-560	405	$x_5 = (582.3 - 234.6) / 597.2$	$x_5/405$
560-700	630	$x_6 = (597.2 - 582.3) / 597.2$	$x_6/630$

$$\sum \theta_i = 0.00361$$

$$\overline{d_p} = \frac{1}{\sum \theta_i} = 276 \mu\text{m}$$

### 3.4 Nem İçeriğinin Tespit Edilmesi

Toz haldeki klinoptilolit numunesindeki ağırlık kaybı, ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Perkin Elmer Pyris 1 Termogravimetrik Analiz Cihazında (TGA), N<sub>2</sub> gaz ortamında, 30°C - 980°C sıcaklık aralığında, 10°C/dakika ısıtma hızında ölçülerek belirlenmiştir. Elde edilen ilgili TGA grafiği **Şekil 3.3**'da verilmiştir.



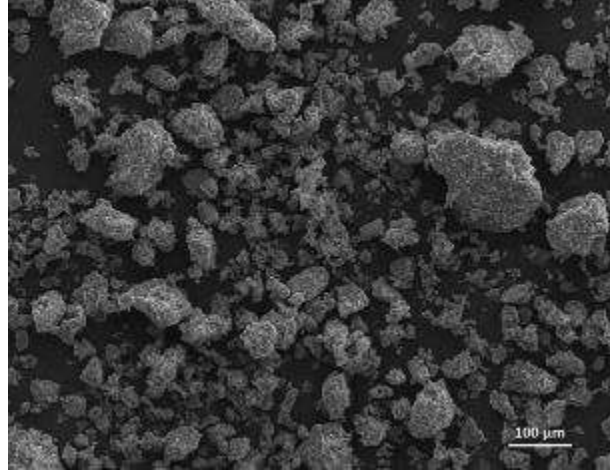
**Şekil 3.3.** Klinoptilolit örneğine ait TGA grafiği

Literatürde yaklaşık % 8-12 (Yetgin, 2006; Tufan, 2002) arasında değişen klinoptilolit nem içeriği mevcut TGA grafiğinden görüldüğü üzere % 20.1 civarındadır. Aradaki bu büyük fark, literatürdeki örneklerle desikatör içinde tuz çözeltisi ile bir ön muamele yapılmasından ve molekül yapısı dışında bulunan nemini bu yolla kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Literatürde 85°C'ye kadar dış kısımdaki nemin, 285°C'ye kadar zayıf bağlı ve 285°C üzerinde kuvvetli bağlı halde bulunan nemin kaybolduğu belirtilmiştir (Yetgin, 2006). TGA grafiğinde de görüldüğü üzere indirgenmiş ağırlık değerinin en yüksek negatif değeri yaklaşık 42°C'de gözlemlenmiş ve bu değerden sonra gittikçe azalarak, yaklaşık 85°C'den sonra sıfıra yakın şekilde seyretmiştir. Bu durum göz önüne alındığında toplam % 20.1'lik su kaybının yaklaşık % 9.5'lik kısmının dış kısımdaki sudan kaybolduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu şekilde düşünüldüğünde zayıf ve kuvvetli bağlı halde molekül yapıda bulunan su miktarı % 10.6 olmaktadır ve bu değer literatürdeki değerlere yakın olduğu görülmektedir.

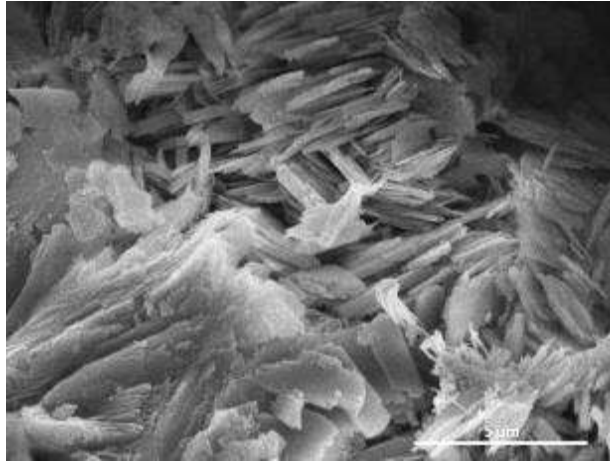
### 3.5 Parçacık Şekil Analizi

Klinoptilolit taneciklerinin şekilsel yapısının analizi için ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda bulunan QUANTA 400F Field Emission (SEM) yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Toz haldeki numunenin SEM görüntüleri çekilmiş ve taneciklerin şekilsel yapısı ile klinoptilolitin üst üste plakalar halindeki karakteristik kristal yapısı (Yetgin, 2006; Güvenir, 2005) görülmüştür. Bu görüntüler sayesinde örnek içeriğinin büyük kısmının klinoptilolit olduğu teyit

edilmiştir. İlgili SEM görüntüsü örnekleri **Şekil 3.4** ve **Şekil 3.5**'de verilmiştir. Mevcut SEM görüntülerinden rastgele seçilen 30'a yakın tanecikten yola çıkılarak, ayrıca kırılmış ve öğütülmüş zeolitlerin küresellik değer aralığı bilgisinden (Inglezakis ve Pouloupoulos, 2006) yararlanılarak SYMPATEC firmasının resmi sitesinden (Niebuhr, 2005) elde edilen bir katalog yardımıyla mevcut klinoptilolit taneciklerinin ortalama küresellik değeri 0.78 olarak bulunmuştur.



**Şekil 3.4.** Öğütülmüş Klinoptilolit taneciklerinin geometrik şekilleri



**Şekil 3.5.** Karakteristik Klinoptilolit kristal yapısı

## 4. SOĞUK SİSTEMLERDE YAPILAN HİDRODİNAMİK ÇALIŞMALAR

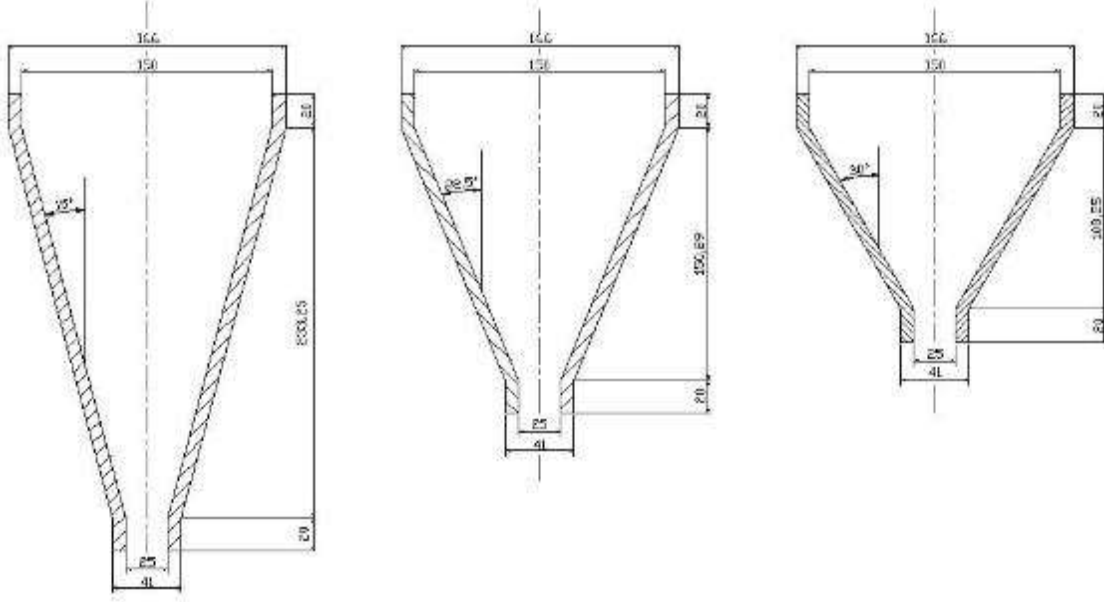
### 4.1 Hidrodinamik Çalışmalar için Kullanılan Deney Sistemleri

#### 4.1.1 Konik ve Yarım Konik Taşkın Yataklar

Literatür özetinde belirtildiği gibi, bu proje kapsamında kurulan sistemin tasarımı için öncelikle literatürde bulunan taşkın-akışkan yataklarda yapılan tüm çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiş ve yapılan tüm çalışmalarda büyük parçacıkların kullanıldığı görülmüştür. Bu projede kullanılan zeolit parçacıkları çok daha küçük olduğu için literatürde belirtilen değerleri direk kullanmak mümkün değildir. Dolayısıyla bütün uygulanabilir geometrik koşulların test edilmesi gereklidir. Bu kapsamda, ilk aşamada proje grubunun daha önce **108M435** kodlu ve '**Taşkın Yatak Nükleer Yakıt Kaplayıcılarının Hidrodinamik Özelliklerinin İncelenmesi**' başlıklı projesi kapsamında üretimini gerçekleştirdiği 30, 45 ve 60 derecelik açılara sahip tam ve yarım konik yataklar (**Şekil 4.1** ve **Şekil 4.2**) kullanılarak bazı ön denemelerin yapılmasına ve geometrik tasarımın elde edilecek bulgular ışığında neticelendirilmesine karar verilmiştir.

Kullanılan yatakların çapı 15 cm'dir ( $D_c$ ). Konik taban çapı ( $D_o$ ) ise 2.5 cm'dir. Bu yatakların zeolit parçacıkları ile çalışabilmesi için pirinçten yapılmış yeni bir gaz girişi (**Şekil 4.3**) ve taban kısmında gerçekleştirilen bazı modifikasyonlar yapılması gerekmiştir. Gaz giriş çapı pirinçten yapılmış vidalı bir aparatın çıkışı olan 1.5 cm'dir ( $D_i$ ). Yatakların diğer geometrik özellikleri **Şekil 4.1**'de görülmektedir.





**Şekil 4.1.** Giriş, orifis giriş çapı ve kolon çapı sabit tutulan, farklı konik açıları için belirlenmiş taşkın yatak geometrileri ( $\gamma = 30^\circ, 45^\circ$  ve  $60^\circ$ )



**Şekil 4.2.** Önceki projede üretilen yatakların konik kısımlarının ilk görüntüleri



**Şekil 4.3.** Gaz girişi aparatı

Gaz giriş çapının taşkınlaşma rejimlerinin oluşumu ve kararlılığına olan etkisinin incelenmesi için 25 mm'lik gaz giriş çapını küçültmek üzere kullanılacak **Şekil 4.4**'de görülen 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 mm iç çaplarına sahip pirinç diskler üretilmiştir. Gaz girişlerinde en üstte yer alan bu disklerin hemen altına küçük çaptaki parçacıkların aşağıya düşmesini engellemek için tel örgü kullanmak yeterli olmamıştır. Bu nedenle **Şekil 4.4**'de sağ üst kısımda görülen uygun gözenekli bir sinter pirinç filtre temin edilmiştir.



**Şekil 4.4.** Gaz girişi için hazırlanan farklı iç çaplardaki pirinç diskler ve pirinç filtre

Akış borusunun taşkınlaşma rejimine etkisinin incelenebilmesi için 3 ayrı çapta ve 4 ayrı boyda toplam 12 adet gözeneksiz metal akış borusu üretilmiştir (**Şekil 4.5**). Akış borularının özellikleri **Çizelge 4.1**'de verilmiştir.

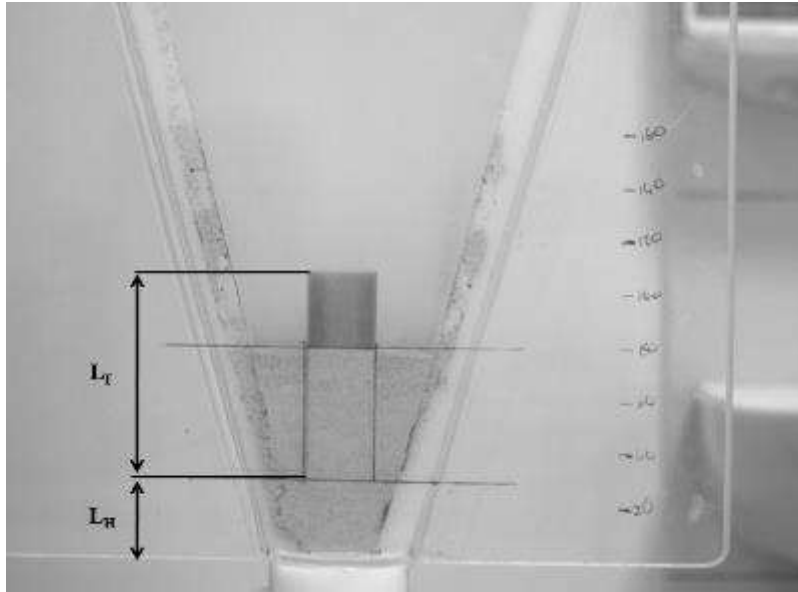


**Şekil 4.5.** İmalatı yapılan akış borularının örnekleri

**Çizelge 4.1.** Üretimi yapılan akış borularının geometrik özellikleri

No	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Uzunluk (cm)
1	13	15	6, 8, 10, 12
2	18	20	6, 8, 10, 12
3	23	25	6, 8, 10, 12

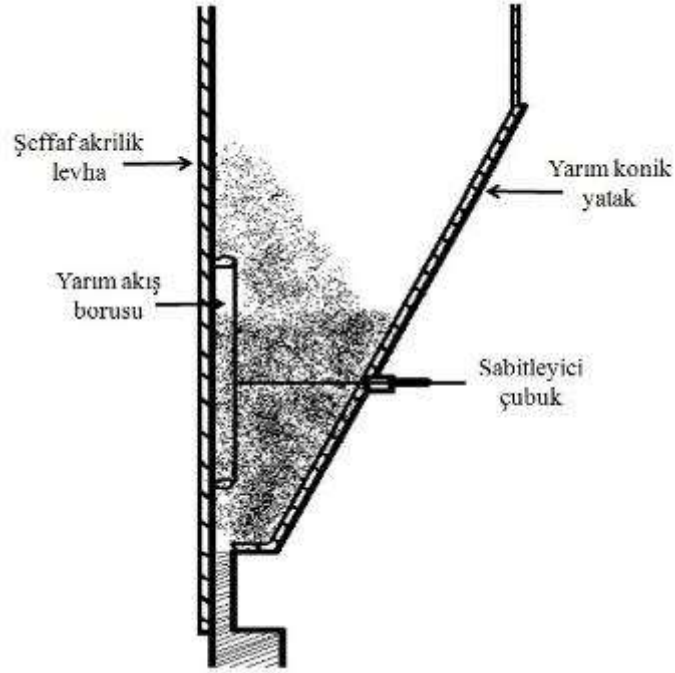
Bu projede, hızlı kamera ölçümleri ile yatak içerisindeki parçacık hareketlerinin görsel olarak izlenmesi amacıyla konik taşkın yataklarıyla aynı özelliklere sahip 30, 45 ve 60 derece açılı yarım konik yataklar da kullanılmıştır. Yarım yatağın yarım konik kısmı Delrin'den üretilmiş, kesit yüzeyine ise 10 mm kalınlığında akrilik yapıştırılmıştır. **Şekil 4.6'**da 30 derece açılı yarım konik taşkın yatağın fotoğrafı görülmektedir.



**Şekil 4.6.** Yarım konik taşkın yatağın fotoğrafı ( $\gamma = 30^\circ$ )

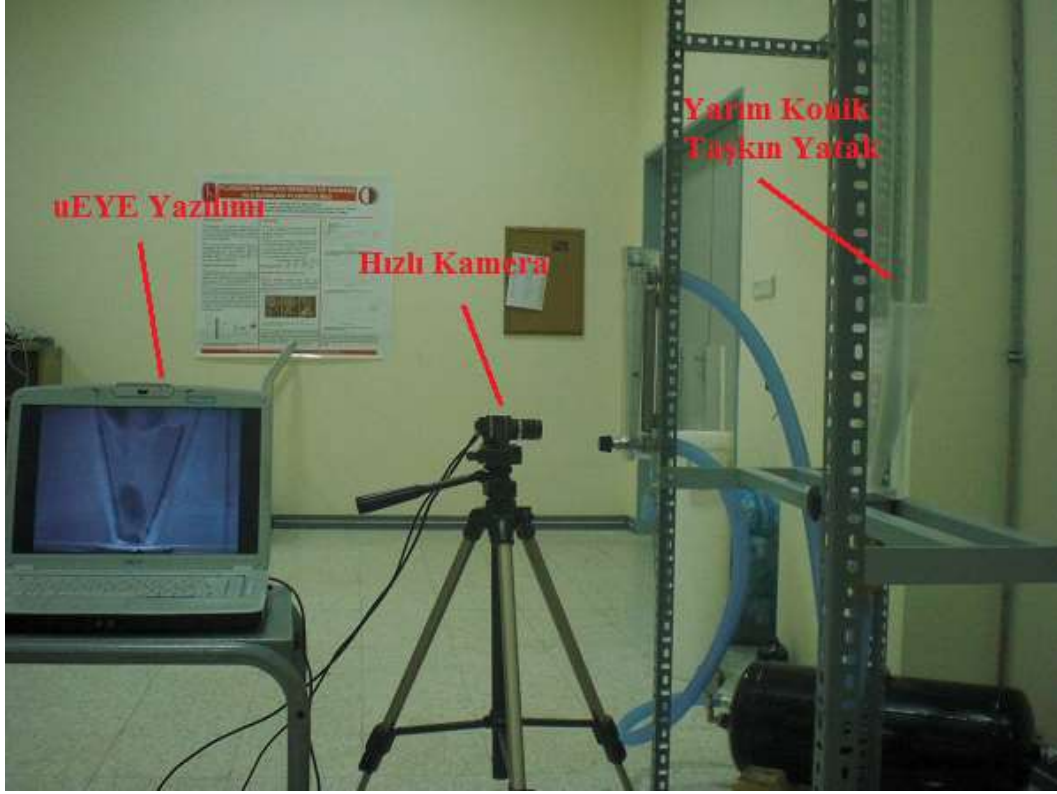
Yarım yataklarda da akış borusunun taşkınlaşma rejimine etkisinin incelenebilmesi için **Çizelge 4.1'**de verilen aynı geometrik özelliklere sahip yarım akış boruları imal edilmiştir. İmal edilen akış borularının ön yüzleri son derece düz ve pürüzsüz bir şekilde hazırlanmış ve deneyler esnasında yatağın ön kısmındaki şeffaf akrilik bölüme tutturulmuştur. Yarım akış borusunun tutturulma işlemi yatak hidrodinamiğini etkilememek amacıyla konik bölgenin alt kısmından değil, yatağın arka

tarafından bir delik yardımıyla uzatılan ince metal bir çubuk sayesinde yapılmıştır. Kullanılan sistemin şeması **Şekil 4.7**'de verilmiştir.



**Şekil 4.7.** Akış borulu yarım taşkın yatağın yandan görünümü

Yatak içerisindeki akış karakteristiklerini görsel olarak incelemek, minimum taşkınlaşma hızını basınç düşümü verileri ile birlikte tanımlayıp belirlemek ve taşkın bölge çapını ölçmek amacıyla yarım konik taşkın yataklardaki hızlı kamera ölçümleri gerçekleştirilmiştir. **Şekil 4.8**'de hızlı kamera ölçümleri için kurulan deney düzeneği görülmektedir. Kullanılan hızlı kamera üzerinde 16 mm'lik PENTAX lens bulunan, IDS marka (uEye-UI-2210-M) siyah/beyaz çekim yapabilen, 1/2" CCD sensörlü, 640 x 480 çözünürlüğe sahip, normal şartlarda 75 fps (frame/s), görüntü alanı daraltılarak 200 fps hıza çıkabilen bir kameradır. Hızlı kamera ölçümleri için hazırlanan deney düzeneğinin gösterildiği **Şekil 4.8** incelenecek olursa 30 derecelik konik açığa sahip yarım taşkın yatağın 40 cm uzaklığına hızlı kameranın yerleştirildiği ve bu kamera ile gerçekleştirilen görsel ölçüm sonuçlarının kamera ile birlikte gelen uEYE yazılımı yardımıyla bilgisayarda kaydedildiği görülmektedir. Kaydedilen görüntüler MATLAB® görüntü işleme yazılımı ile analiz edilmiştir.



**Şekil 4.8.** Hızlı kamera deney düzeneği

#### **4.1.2 Taşkın-Akışkan Yataklar**

Literatürde, akış borulu taşkın-akışkan yataklarda mikronize parçacıklarla gerçekleştirilen herhangi bir çalışma olmaması sebebiyle, kurutucu sistemin tasarımına ışık tutması amacıyla öncelikle yarım konik taşkın-akışkan yatakta sistemin hidrodinamiğinin incelenmesine tasarımın elde edilecek bulgular ışığında neticelendirilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla, 30 ve 60 derecelik açıya sahip 2 tane yarım taşkın yatağın duvar kısmına akışkanlaştırıcı gazın beslenebilmesi için delikler açılmış, zeolit parçacıklarının bu deliklerden düşmemesi için ise geçirgenliği oldukça düşük bir bez filtre kullanılmıştır. Deliklerden yatağa gaz beslemesi konik kısmın etrafına kurulan gaz besleme haznesi ile gerçekleştirilmiştir. **Şekil 4.9'**de delikli konik bölge duvarı, **Şekil 4.10'**de ise akışkanlaştırma gazının sisteme beslenmesi için tasarlanan gaz haznesinin fotoğrafları verilmektedir.





**Şekil 4.9.** Gaz dağıtıcı görevindeki delikli konik bölge duvarı



**Şekil 4.10.** Akışkanlaştırma gazının sisteme beslenmesi için tasarlanan gaz haznesi

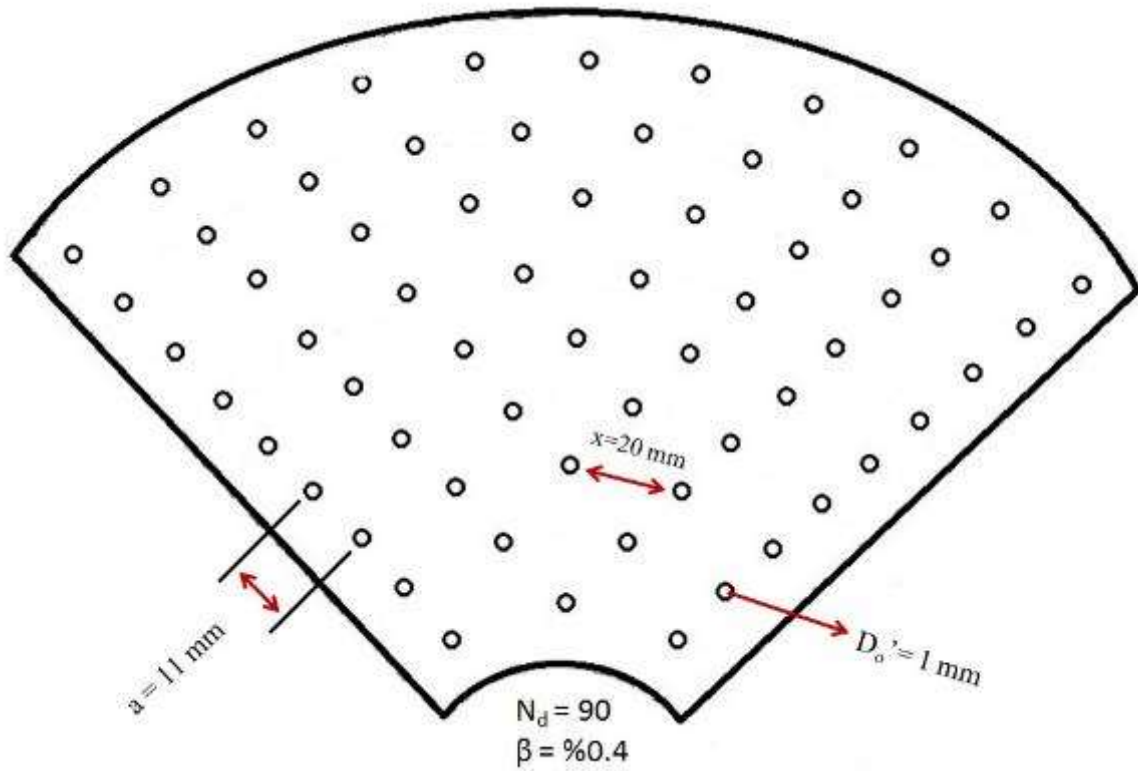
**Çizelge 4.2**'de 30 ve 60 derecelik taşkın-akışkan yatakların konik bölge yanal alanları, bu bölgedeki delik sayıları ve açıklık oranları verilmektedir. **Çizelge 4.2**'den görüleceği üzere 30 ve 60 derecelik taşkın-akışkan yatakların akışkanlaşma gazı için kullanılan yanal alanlarındaki açıklık oranı % 0.4 olarak tasarlanmıştır. Bu açıklık oranı akışkanlaşma gazını tüm deliklere eşit şekilde dağıtmak için gerekli basınç düşümünü sağlamaktadır.

**Çizelge 4.2.** 30 ve 60 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatakların yanal alan özellikleri

Parametre	30 derece	60 derece
Yanal Alan (mm <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	33176	17180
Delik çapı (mm)	1	1
Delik sayısı	169	90
Açıklık oranı, $\beta$ , %	0.4	0.4

<sup>1</sup>Yarım yatak yanal alanı

Örnek olarak 60 derecelik taşkın-akışkan yatak için yanal bölge delik dağılımı **Şekil 4.11**'da verilmiştir.



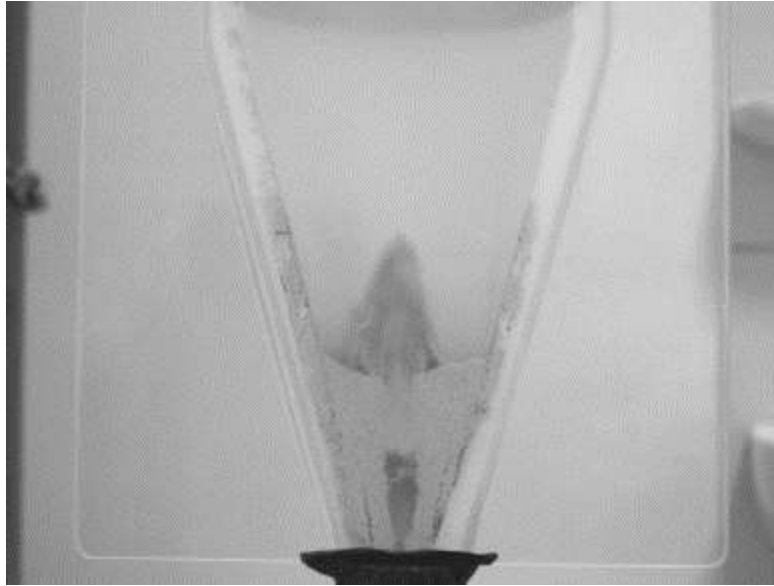
**Şekil 4.11.** 60 derecelik yarım taşkın-akışkan yatak için duvar bölgesi gaz dağıtıcı tasarımı



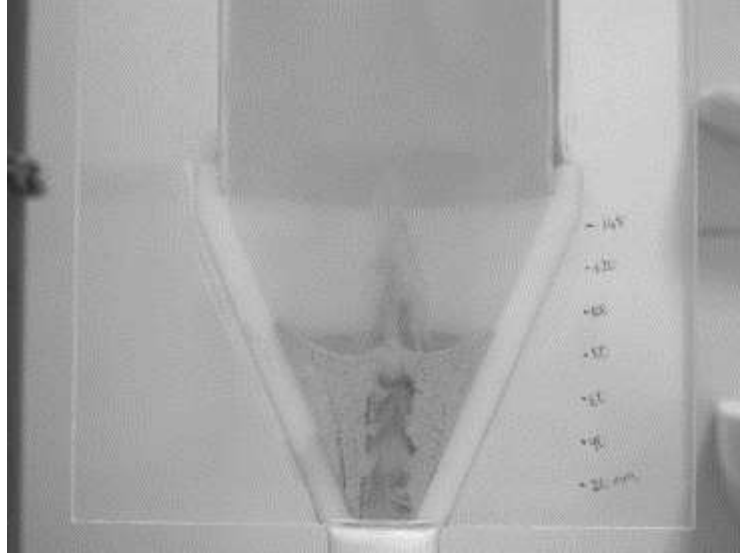
## 4.2 Tam ve Yarım Konik Taşkın Yataklarda Gaz-Katı Akışının Karakterizasyonu, Basınç Düşümü Ve Minimum Akışkanlaşma Hızı Ölçümleri

### 4.2.1 Akış borusuz yarım taşkın yatakta yapılan ön çalışmalar

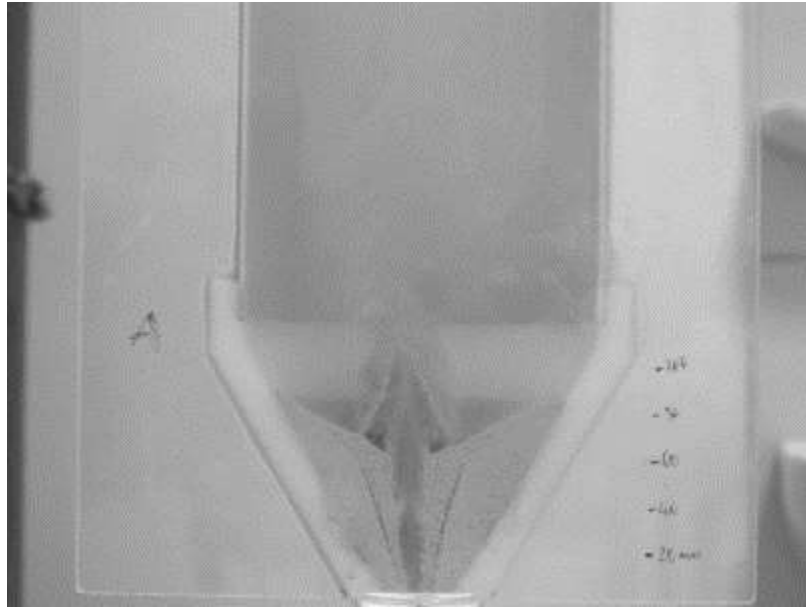
İlk deneyler mikronize klinoptilolit parçacıklarının taşkın bir yatakta göstereceği davranışı incelemek amacıyla 30, 45 ve 60 derecelik *yarım konik yataklar* kullanılarak yapılmıştır. Üç farklı yarım konik yatakta 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 mm gaz girişleri ile farklı sabit yatak yüksekliklerinde yapılan bütün deneyler neticesinde, gözlemsel olarak taşkın diye tanımlanabilecek davranışın sadece 60 derecelik yatakta ve 2 mm ile 4 mm çapındaki gaz girişleri kullanıldığında elde edildiği görülmüştür. **Şekil 4.12**, **Şekil 4.13** ve **Şekil 4.14**'de 4 mm çapındaki gaz girişleri kullanıldığında hızlı kamera ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. **Şekil 4.12** ve **Şekil 4.13**'te görüldüğü gibi kararlı bir taşkın (spout) 30 ve 45 derecelik konik yataklarda elde edilememiş, açının darlığı parçacıkların halka bölgesinden taşkın bölgesine yığınlar halinde dökülerek taşkının kesikli, çökmeli ve kararsız bir halde oluşmasına sebebiyet vermiştir.



**Şekil 4.12.** 30 derecelik yarım konik yatakta parçacık davranışı ( $U_o = 15$  m/s,  $D_i = 4$  mm,  $H_b = 8$  cm)



**Şekil 4.13.** 45 derecelik yarım konik yatakta parçacık davranışı ( $U_o = 15$  m/s,  $D_i = 4$  mm,  $H_b = 8$  cm)



**Şekil 4.14.** 60 derecelik yarım konik yatakta parçacık davranışı ( $U_o = 15$  m/s,  $D_i = 4$  mm,  $H_b = 8$  cm)

Hızlı kamera ile elde edilen görüntülerde yatak içinde oluşan taşkın niteliği ve yatakta parçacıkların devirsel hareketinin olduğu bölge rahatlıkla fark edilmektedir. Parçacıklı malzemenin içerisinde kendiliğinden daha koyu renkli olanların taşkın yakınında çizgi şeklinde oluşturdukları kısım parçacıkların devirsel hareketinin olduğu bölgeyi göstermektedir. 60 derecelik yatağa ait **Şekil 4.14**'deki görüntüde parçacıkların devirsel hareket bölgesinin iyice daraldığı ama diğer bir yandan taşkın daha kararlı bir şekilde olduğu görülmektedir.

Yarım yataklarda elde edilen sonuçlar akış borusu kullanılmadığı takdirde ancak 4 mm gibi küçük bir gaz girişi çapında taşkınlaşma oluşturulabileceğini ve bunun da ileride gerçekleştirilecek taşkın-akışkan yataklı kurutma uygulamasında tamamen elverişsiz bir duruma neden olacağını göstermiştir. Buradan yola çıkılarak akış borusu kullanımının uygulanabilir gaz giriş çapını büyüteceği ve kararlı bir taşkınlaşmanın oluşmasını sağlayacağı için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

#### **4.2.2. Akış borulu yarım ve tam taşkın yataklarda yapılan hidrodinamik çalışmalar**

Akış borusunun taşkınlaşma rejimine etkisinin incelenebilmesi için özellikleri **Çizelge 4.2**'de verilen akış boruları kullanılarak 30 dereceli konik ve yarım konik yataklarda deneyler yapılmıştır. Kullanılan zeolit parçacıklarının oldukça küçük ( $d_p = 276 \mu m$ ) olmasından dolayı yatağın tabanından direk olarak basınç düşümü ölçülebilmiştir. Çünkü böyle bir durumda basınç düşümü ölçüm cihazının içine toz kaçıp bozulabilmektedir. Bu nedenle gaz giriş kısmının altındaki borudan toplam basınç düşümü ölçümleri yapılmıştır. Hidrodinamik analizleri yapabilmek için her deney öncesinde, gaz girişinde yer alan pirinç disk ve pirinç filtrenin boş yatakta oluşturduğu basınç düşümü farklı gaz hızlarında ölçülmüş ve ölçülen bu değerler deney sırasında ölçülen toplam yatak basınç düşümünden çıkarılarak yatak basınç düşümü elde edilmiştir. Azot gazının çizgisel hız değerleri, hacimsel gaz akış hızının 10 mm çapındaki gaz girişinin kesit alanına bölünmesi ile belirlenmiştir. Basınç düşümü ölçümleri, gaz hızının gittikçe artırıldığı ve belirli bir değerden sonra aynı gaz hızı değerlerinde durmak suretiyle basamak basamak düşürüldüğü koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Çok Fazlı Akış Laboratuvarında mevcut bulunan DC akımlı güç kaynağı ve LabVIEW® yazılımı kullanılmıştır. Basınç sensöründen elde edilen analog voltaj sinyali, yüksek hızda veri toplayabilen veri toplama kartı (National Instruments NI PCI-6280) ile bir bilgisayara gönderilmiş ve LabVIEW® yazılımı ile işlenmiştir. Ölçümler, 1 kHz örnekleme frekansı ve 20 saniye örnekleme zamanında yapılmıştır. Her ölçüm 3 kere tekrarlanmış ve bu üç ölçümün ortalamaları rapor edilmiştir. WANG

(2006) tarafından önerilen yöntem uygulanarak, sabit çalışma koşullarına ulaşabilmek için, ölçümlerden önce taşkın yataklar bir saat yüksek hava debisinde çalıştırılmıştır.

Deneyler sırasında akış borusu, merkezi gaz girişinin merkezi ile çakışık durumda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Gaz giriş deliği ile akış borusunun alt kısmı arasında 'kaldırma yüksekliği ( $L_H$ )' diye tanımlanan mesafe, halka bölgesinin alt kısmı ile konik duvar bölgesinin arasındaki uzaklığı çok daraltmamak ve parçacıkların devirsel hareketinin engellenmesini önlemek için, 30 mm olarak ayarlanmıştır. Deneyler esnasında taşkınlaşma gazı olarak hava ile aynı fiziksel özelliklere sahip saf azot gazı kullanılmıştır. Bu sayede olası gaz hızı salınımları engellenmiş ve deneyler sırasındaki ölçümler yüksek bir hassasiyetle yürütülmüştür.

Akış borulu taşkın veya taşkın-akışkan yatak sistemlerinde statik yatak yüksekliği (başlangıçta yatağa doldurulan malzemenin sabit yatak yüksekliği,  $H_b$ ) yatak hidrodinamiğini büyük oranda etkilemektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda genel olarak kullanılan statik yatak yüksekliği ya akış borusunun bittiği noktaya kadar (Osorio-Reville vd., 2004a) ya da akış borusunun  $L_H$  kadar altında kalacak şekilde, yani diğer bir deyişle yatak yüksekliğinin akış borusu boyuna eşit olduğu kadar kullanılmıştır (Marmo, 2007; Arsenijevic vd., 2004; Nagashima vd., 2011). Bu çalışmada öncelikle statik yatak yüksekliği akış borusunun tepesine kadar ayarlanmış ve denemeler yapılmıştır. Bu denemelerin her birinde, akış borusunun tepesine yakın bölgesinde yuvarlak bir çukur oluşarak tepe kısımdan içeri dökülmeler olmuş ve kararlı taşkınlaşma oluşumu kötü yönde etkilenmiştir. Bu denemeler ışığında, yatak yüksekliğinin akış borusu kadar ayarlanmasına ( $H_b = L_T$ ) karar verilmiştir. Bu sayede akış borusunun üst kısmı yatak yüzeyinden  $L_H$  kadar yukarıda kalmaktadır ve taşkınlaşma esnasında yatak yüzeyinden herhangi bir olumsuz etkiyle karşılaşılmamaktadır. **Şekil 4.6'**da bu şekilde doldurulan bir yatağın görüntüsü yer almaktadır.

Tam yataklarda yapılan ön deneylerde gaz giriş çapının taşkınlaşmaya olan etkisi incelemek için **Şekil 4.4'**de gösterilen pirinç diskler kullanılmıştır. Gaz giriş çapının 10 mm'den fazla olduğu durumlarda yatağın üst kısmında sağa sola yatan, fıskiye tepesinin yer değiştirdiği ve taşkında çökmelerin olduğu bir davranış gözlemlenmiştir. Kararlı bir taşkınlaşma bu koşullarda elde edilememiştir. Dolayısıyla kararlı bir taşkınlaşmanın görüldüğü en yüksek gaz giriş çapı olan 10 mm'nin bundan sonraki deneylerde kullanılmasına karar verilmiştir.

Deney koşulları ve deney matrisi **Çizelge 4.3** ve **Çizelge 4.4**'de özetlenmektedir. **Çizelge 4.4**'de verilen deney matrisinde kutu içinde çarpı işareti ile gösterilen koşullardaki bütün deneyler hem yarım hem de tam konik yataklarda gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Deney Koşulları

$D_i$ (mm)	$D_o$ (mm)	$\gamma(^{\circ})$	$L_H$ (mm)	$H_o$ (mm)
10	25	30	30	$H_o=L_T$

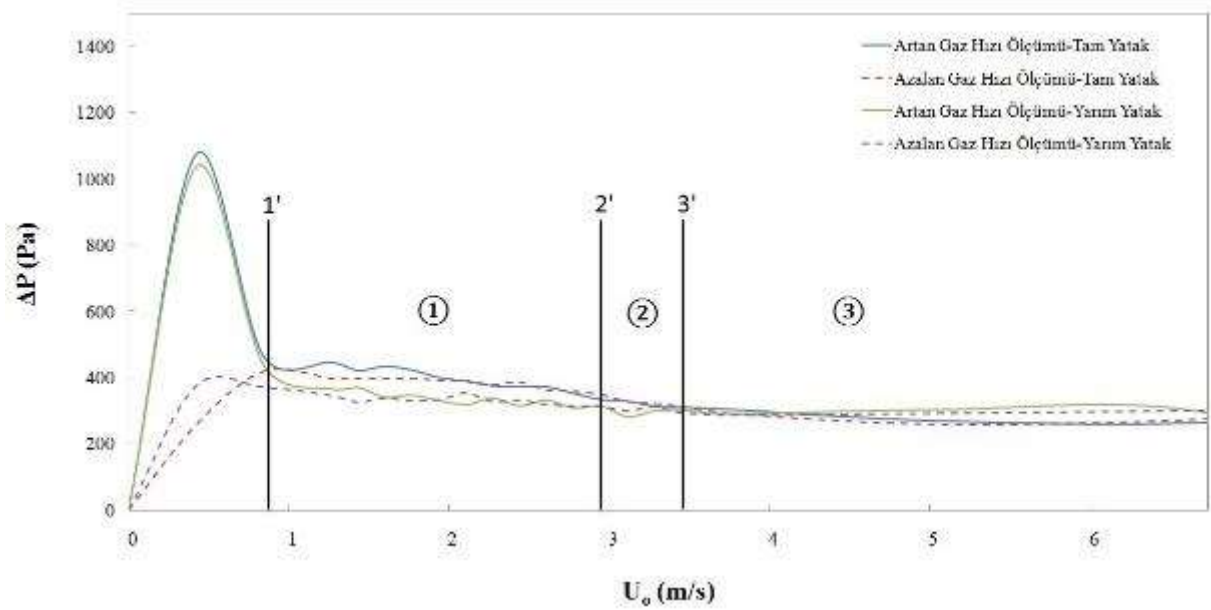
**Çizelge 4.4.** Deney Matrisi

$D_T$ (mm) \ $L_T$ (mm)	13	18	23
80	☒	☒	☒
100	☒	☒	☒
120	☒	☒	☒

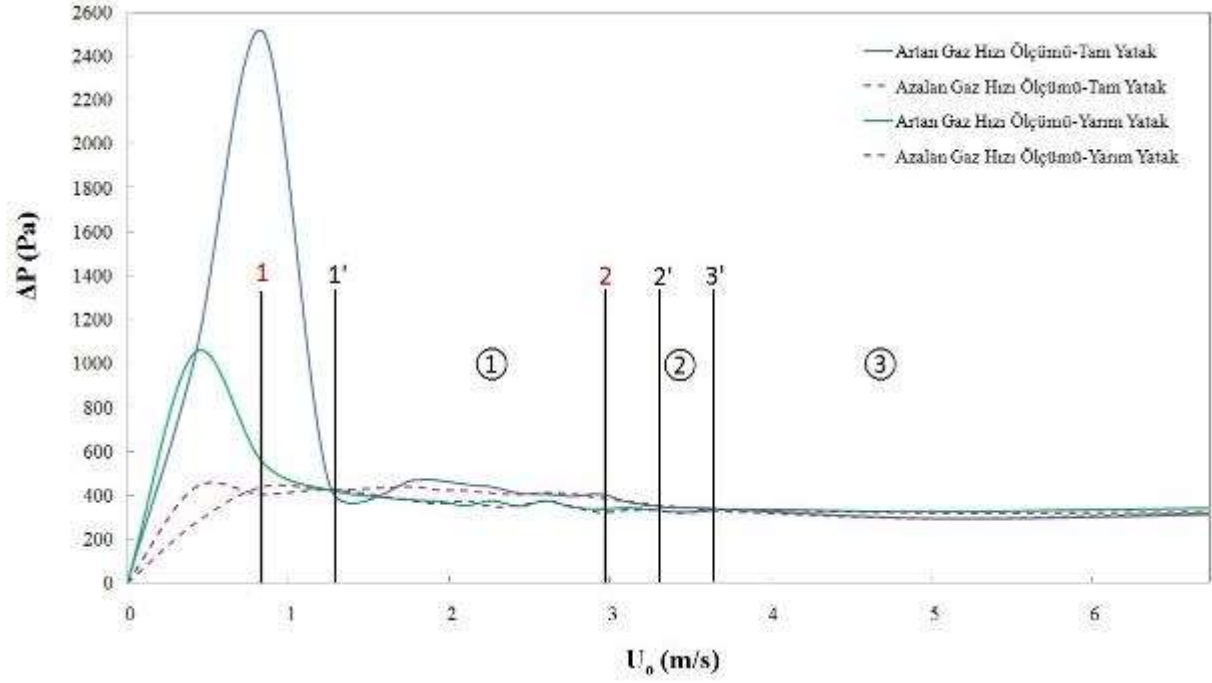
Hem yarım hem tam konik yataklarda yapılan her deneyde gaz hızı 0 m/s değerinden yaklaşık 7 m/s değerine kademeli bir şekilde artırılmış daha sonra ise aynı yol izlenerek 0 m/s değerine geri dönmüştür. Deneyler sırasında basınç düşümü ve basınç düşümü verilerine ait standart sapma değerleri kaydedilmiştir. Yarım yatak deneylerinde basınç düşümü ölçümlerine ek olarak hızlı kamera ile detaylı görsel incelemeler de yapılmıştır. **Şekil 4.15-Şekil 4.15'**de 23 mm iç çapa sahip 3 farklı boyda akışkan borusu kullanılarak yarım yatakta ölçülen basınç düşümü eğrileri örnek olarak verilmiştir. Basınç düşümü ölçümleri **Çizelge 4.4**'de belirtilen her koşul için aynı şekilde tekrarlanmıştır. **Şekil 4.15-Şekil 4.15'**de görüldüğü üzere gaz hızı artarken elde edilen basınç düşümü grafiğinde bir tepe (peak) basınç düşümü bulunmakta bu tepe basınç düşümü hız azalırken gözlemlenmemektedir. Bu basınç düşümü-gaz hızı histeresisi (kesikliği) düşük ve yüksek yoğunluklu parçacıklı sistemlerde de gözlemlenmiştir (Wang, 2006; Sari vd., 2012). Bu şekillerde yer alan ve (1') ile gösterilen nokta sabit yatak direncinin kırılarak akış borusu içindeki yatak malzemesinin inişli çıkışlı bir şekilde hareket etmeye başlamasını göstermektedir. Bu davranış, ① ile gösterilen bölge boyunca belirli aralıklarla taşkınlaşmalar oluşsa da devam etmiştir. (2') ile gösterilen nokta bu davranışın sona erip kararsız bir taşkınlaşmanın devam etmeye başladığı noktadır. Bahsi geçen bu nokta mevcut çalışma kapsamında gerçekleştirilen

deneyler için minimum taşkınlaşma hızı ( $U_{msd}$ ) olarak kabul edilmiştir. ② ile gösterilen bölge boyunca fıskiye yüksekliği devamlı değişen kararsız bir taşkınlaşma devam etmiştir. Bu kararsız davranış (3') ile gösterilen noktada son bulup ③ ile gösterilen bölge boyunca artık fıskiye yüksekliği çok değişmeyen kararlı bir taşkınlaşma elde edilmiştir. (3') noktasında elde edilen hız minimum kararlı taşkınlaşma hızı ( $U_{mssd}$ ) olarak kabul edilmiştir.

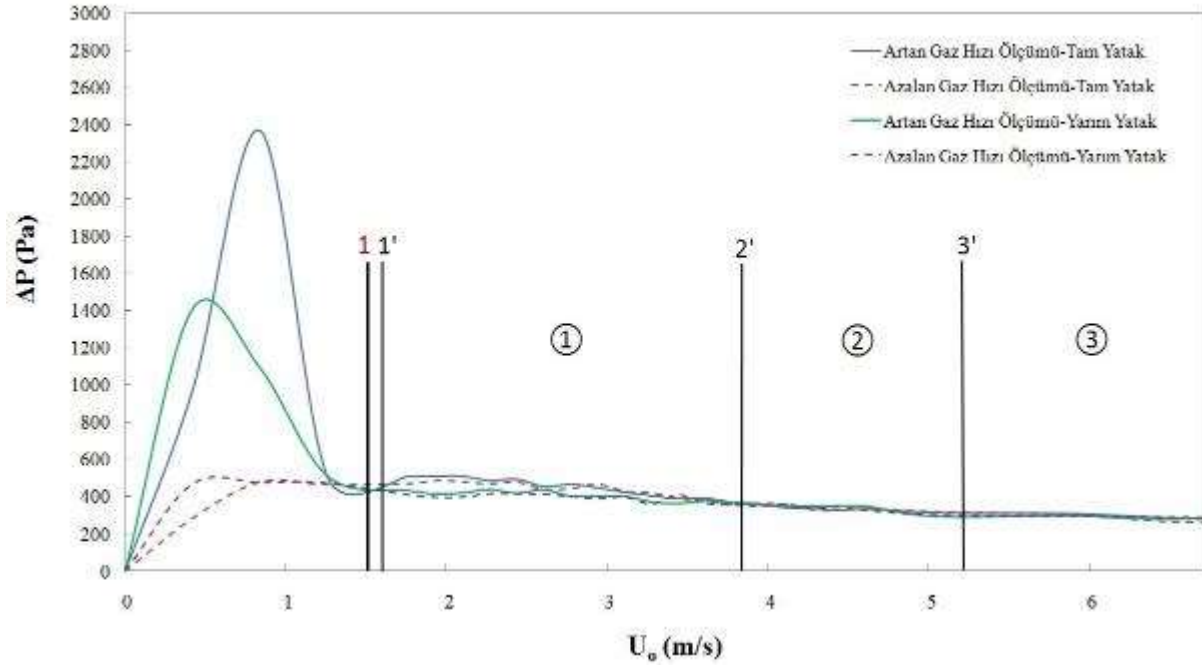
Şekillerde kırmızı rakamlar ile gösterilen çizgiler, tam yatakta elde edilen verilere aittir. Bu çizgiler incelendiğinde, özellikle minimum taşkınlaşma ve kararlı taşkınlaşma noktalarında yarım ve tam yatağa ait sonuçlar arasında önemli bir farkın olmadığı ve hatta grafiklerin birçoğunda gösterge çizgilerinin kesiştiği görülmektedir. Bu durum hidrodinamik analizlerin tam yerine yarım yataklarda yapılabileceğini göstermektedir. Bu da görsel veri elde edilmesi için büyük bir avantaj oluşturmaktadır.



**Şekil 4.15.** Tam ve yarım yatakta elde edilen basınç düşümü eğrilerinin karşılaştırılması  
( $H_b = 8$  cm,  $L_T = 8$  cm,  $L_H = 30$  mm,  $D_T = 23$  mm,  $\gamma = 30^\circ$ )



**Şekil 4.16.** Tam ve yarım yataкта elde edilen basınç düşümü eğrilerinin karşılaştırılması  
( $H_b = 10$  cm,  $L_T = 10$  cm,  $L_H = 30$  mm,  $D_T = 23$  mm,  $\gamma = 30^\circ$ )



**Şekil 4.17.** Tam ve yarım yataкта elde edilen basınç düşümü eğrilerinin karşılaştırılması  
( $H_b = 12$  cm,  $L_T = 12$  cm,  $L_H = 30$  mm,  $D_T = 23$  mm,  $\gamma = 30^\circ$ )

Yarım ve tam yataklarda ölçülen basınç düşümü eğrileri kullanılarak belirlenen minimum taşkınlaşma hızı ve minimum kararlı taşkınlaşma hızı sonuçları sırasıyla **Çizelge 4.5** ve **Çizelge 4.6**'da özetlenmiştir. Yukarıda belirtildiği üzere, deneyler sırasında statik yatak yüksekliği ( $H_b$ ), akış borusunun üst kısmı yatak yüzeyinden  $L_H$  kadar yukarıda kalacak şekilde yani ' $H_b = L_T$ ' olacak şekilde ayarlanmıştır. Dolayısıyla, akış borusunun boyu arttıkça statik yatak yüksekliği de artmıştır. Bu çizelgelerden görülebileceği üzere, minimum taşkınlaşma ve kararlı taşkınlaşma hızları, akış borusu boyu ve statik yatak yüksekliği ile artmaktadır. Bu eğilim akış borusu çapı fark etmeksizin her deneyde gözlemlenmiştir. Akış borusunun çapı ile ise taşkınlaşma hızlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir.

**Çizelge 4.5.** Minimum taşkınlaşma hızı ( $U_{msd}$ ) sonuçları

$D_T$ (mm) \ $L_T$ (mm)	13		18		23	
	Tam yatak	Yarım yatak	Tam yatak	Yarım yatak	Tam yatak	Yarım yatak
<b>80</b>	2.1 m/s	2.1 m/s	2.8 m/s	2.8 m/s	2.9 m/s	2.1 m/s
<b>100</b>	2.4 m/s	2.4 m/s	2.9 m/s	3.1 m/s	3.3 m/s	2.9 m/s
<b>120</b>	2.6 m/s	2.4 m/s	3.5 m/s	3.5 m/s	3.5 m/s	3.5 m/s

**Çizelge 4.6.** Minimum kararlı taşkınlaşma hızı ( $U_{mssd}$ ) sonuçları

$D_T$ (mm) \ $L_T$ (mm)	13		18		23	
	Tam yatak	Yarım yatak	Tam yatak	Yarım yatak	Tam yatak	Yarım yatak
<b>80</b>	2.9 m/s	2.9 m/s	3.3 m/s	3.3 m/s	3.5 m/s	3.8 m/s
<b>100</b>	3.5 m/s	3.5 m/s	3.6 m/s	3.6 m/s	3.8 m/s	3.6 m/s
<b>120</b>	3.5 m/s	3.3 m/s	4.3 m/s	4.3 m/s	5.1 m/s	5.1 m/s

Yukarıda bahsedilen bütün deneylerde gaz giriş deliği ile akış borusunun alt kısmı arasında 'kaldırma yüksekliği ( $L_H$ )' diye tanımlanan mesafe 30 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Kaldırma yüksekliğinin yatak hidrodinamiğine etkisinin daha net anlaşılabilmesi için 30 derecelik yarım taşkın yatakta,  $L_H$  değeri 40 ve 50 mm ayarlanarak basınç düşümü ölçümleri yapılmıştır. Bu deneylerde 23 mm çap ve 8 cm boyundaki akış borusu kullanılmıştır. Basınç düşümü



grafiklerinden elde edilen karakteristik pik basınç düşümü, minimum kararlı taşkınlaşma basınç düşümü, minimum taşkınlaşma gaz hızı ve minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızı değerleri **Çizelge 4.7 - Çizelge 4.10**'da özetlenmektedir. Bu çizelgeler incelendiğinde, artan kaldırma yüksekliğinin bir sonucu olarak tepe (peak) basınç düşümü değerlerinin ve minimum kararlı taşkınlaşma basınç düşümü değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum akış borusunun alt kısmının yükseklerle çıkması sonucu yatak malzemesinin ağırlığının gaz girişi kısmında taşkınlaşmaya daha büyük direnç göstermesi ile açıklanabilir. Dolayısıyla yatak tabanından yükselen gazın akış borusu içinde inmeli çıkmalı bir şekilde harekete sebep olmasından hemen önce, düşük kaldırma yüksekliklerine oranla gittikçe daha yüksek tepe basınç düşümleri elde edilmiştir. Minimum taşkınlaşma hızı ve minimum kararlı taşkınlaşma hızları da kaldırma yüksekliği artırıldıkça artmıştır. Yukarıda değinilen noktalara ek olarak, artan kaldırma yüksekliği ile yatağın içinde aşağıya doğru hareket edip taşkınlaşma akımına katılan taneciklerin miktarı da artmış ve kararlı bir taşkınlaşmanın oluşmasını geciktirmiştir. 40 ve 50 mm'lik kaldırma yüksekliği koşullarında, akış borusu çapı her ne kadar gaz giriş çapından 2.3 kat daha büyük olsa da daha akış borusu tabanına ulaşmadan genişleyen taşkın bölge, akış borusunun yanlarından ayrılarak yatak yüzeyine düzensiz bir şekilde ulaşmaya başlamıştır. Bu durum uygulama için oldukça elverişsizdir. Dolayısıyla, kurutucu tasarımında  $L_H$  değerinin 30 mm alınmasının uygun olduğuna karar verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Tepe (peak) basınç düşümü sonuçları

$L_H$ (mm) \ $L_T$ (mm)	30	40	50
80	1037 Pa	1903 Pa	2404 Pa

**Çizelge 4.8.** Minimum kararlı taşkınlaşma basınç düşümü sonuçları

$L_H$ (mm) \ $L_T$ (mm)	30	40	50
80	337 Pa	405 Pa	494 Pa

**Çizelge 4.9.** Minimum taşkınlaşma hızı ( $U_{msd}$ ) sonuçları

$L_H$ (mm) \ $L_T$ (mm)	30	40	50
80	2.1 m/s	3.5 m/s	3.8 m/s

**Çizelge 4.10.** Minimum kararlı taşkınlaşma hızı ( $U_{mssd}$ ) sonuçları

$L_H$ (mm) \ $L_T$ (mm)	30	40	50
80	3.8 m/s	4.6 m/s	5.0 m/s

**Taşkın akışkan yataklarda elde edilen bulgular:**

Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Zeolit parçacıkları akış borusu kullanılmayan 30 ve 45 dereceli konik taşkın yataklarda taşkınlaştıramamaktadır. 60 dereceli konik taşkın yatakta ise taşkınlaşma ancak gaz giriş çapı özel olarak hazırlanan pirinç disk yardımıyla 4 mm çapına düşürüldüğü zaman gözlemlenebilmiştir. Fakat bu koşulda dahi yatağın çok büyük bir kısmının hareketsiz şekilde durması sağlıklı bir uygulamanın yapılmasını olanaksız kılmıştır. Bu sonuçlar mikronize boyuttaki zeolit parçacıklarının taşkınlaştırılabilmesi için akış borusunun gerekli olduğunu göstermiştir.
- Akış borusunun kullanımı, 30 derecelik konik açığa sahip yatakta ve daha geniş gaz giriş çapında dahi kararlı bir taşkınlaşmanın oluşumuna izin vermiştir. Ayrıca yatağın duvar kısmında oluşan ölü bölgede de kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir.
- 3 farklı çapta (13, 18 ve 23 mm) ve 4 farklı boyda (60, 80, 100, 120 mm) imal edilen akış boruları ile 30 derecelik konik açığa sahip yarım ve tam taşkın yatakta yapılan deneylerde, akış borulu yarım taşkın yatak deney sonuçlarının tam yatak deney sonuçları ile büyük oranda birbiriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir.
- Basınç düşümü ölçümleri ve minimum kararlı akışkanlaşma hızının akış borusu boyu ile arttığı ancak akış borusu çapı ile çok değişmediği görülmüştür.

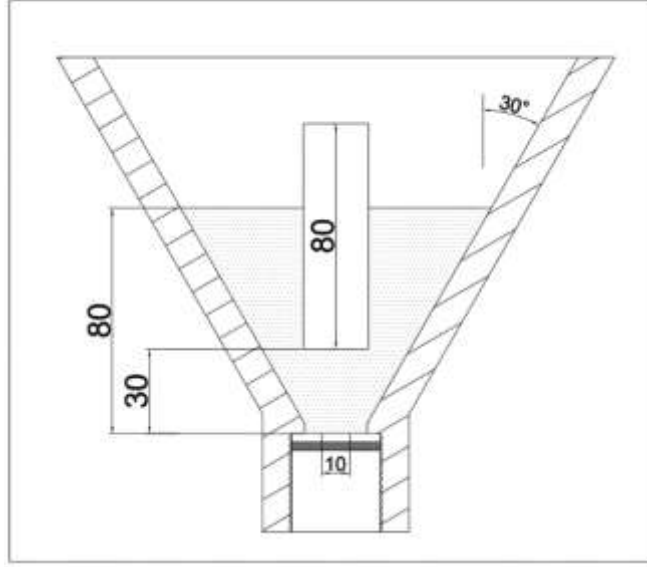
- Yarım ve tam yataklarda minimum taşkınlaşma ve minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızlarının yatak yüksekliği arttıkça arttığı, ancak bu hızlarla ilgili akış borusunun çapına bağlı tutarlı ve belirgin bir değişim olmadığı belirlenmiştir.
- Kaldırma yüksekliği genel olarak yatak basınç düşümü değerlerinde ve taşkınlaşma hızlarında oldukça belirgin bir artışa sebep olmuştur. Ayrıca kaldırma yüksekliğinin 30 mm'nin üzerine çıktığı koşullarda taşkın bölgenin akış borusu dışına taştığı gözlemlenmiştir. Bu durum uygulama açısından elverişsiz bulunmuş ve 30 mm'lik kaldırma yüksekliğinin tasarım açısından en uygun değer olduğu saptanmıştır.

### 4.3 Konik ve Yarım Konik Taşkın- Akışkan Yataklarda Gaz-Katı Akışının Karakterizasyonu, Basınç Düşüşü ve Minimum Akışkanlaşma Hızı Ölçümleri

Bir önceki bölümde tam ve yarım taşkın akışkan yataklarda gerçekleştirilen hidrodinamik çalışmaların sonuçları sunulmuştu. Bu bölümde ise yarım **taşkın-akışkan** yataklarda gerçekleştirilen gaz-katı akışı karakterizasyonu çalışmaları ve basınç düşümü ve minimum akışkanlaşma hızı ölçüm sonuçları tartışılacaktır. Bu kapsamda 30 ve 60 derecelik konik açığa sahip yarım kesitli taşkın-akışkan yataklarda basınç düşümü, minimum kararlı taşkınlaşma hızı ve hızlı kamera ile parçacık hareketleri ve ölü bölge gözlem deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde sonuçları detaylı bir biçimde sunulan basınç düşümü ve hızlı kamera deneylerinin amacı akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu tasarımı için en uygun açığı ve akış borulu taşkın-akışkan yatak için kararlı minimum taşkınlaşma hızlarını ve akışkanlaşma hızının minimum taşkınlaşma hızı üzerindeki etkisini belirlemektir.

#### 4.3.1 60 Derecelik Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatak ile İlgili Deney Sonuçları

60 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatağın geometrik ölçüleri ve deney koşulları **Şekil 4.18** ve **Çizelge 4.11**'de verilmiştir.



**Şekil 4.18.** Yarım taşkın-akışkan yatak ölçüleri ( $\gamma = 60^\circ$ )

**Çizelge 4.11.** Deney koşulları ( $\gamma = 60^\circ$ )

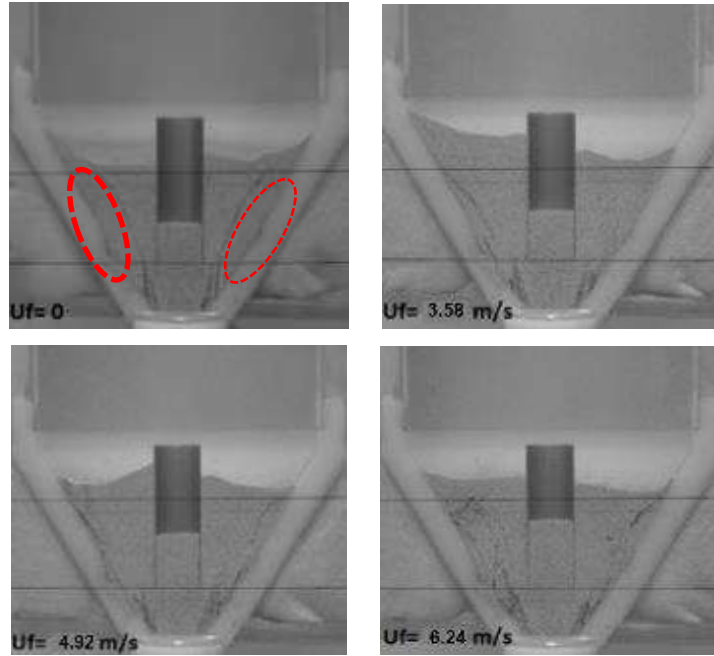
Parametreler	Değerler
Konik Açısı	$60^\circ$
Akış Borusu Yüksekliği	80 mm
Akış Borusu İç Çapı	23 mm
Akış Borusunun Yatak Girişinden Yüksekliği	30 mm
Statik Yatak Yüksekliği	80 mm
Taşkın Hava Giriş Çapı	10 mm
Yatak Malzemesi Ağırlığı	160 gr

60 derece için öngörülen ve çözülmesi gereken en önemli problem halka kısmında duvara yakın bölgelerde gözlemlenen ölü bölgelerdir. Büyük konik açısı ve küçük parçacık çapından dolayı duvara yakın bölgelerde parçacıkların topaklanması ve hareketsiz kalma sorununun duvarda oluşturulan akışkanlaşma deliklerinden beslenen havayla ortadan kaldırılması öngörülmüştür.

**Şekil 4.19'**de 4 farklı akışkanlaşma gaz hızı ile yapılan deneylerin sonundaki (taşkın ve akışkanlaşma gaz hızları kesildikten sonra) yatak malzemesinin son hali gösterilmiştir. **Taşkınlaşma ve akışkanlaşma hızları taşkın havası giriş alanına göre tanımlanmıştır<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Bu kapsamda taşkın havası giriş alanı 10 mm giriş çapına karşılık gelen alanın yarısıdır.

Akışkanlaşma hava hızının,  $U_f$ , sıfır olduğu durumda (yatağın taşkın yatak olarak işletimi) duvara yakın bölgelerde hareketsiz kalan parçacıklar siyah çizgi oluşturarak gözlenmektedir. İki tarafta da olan siyah çizgiler orta bölgede hareketli parçacıklarla kenardaki sabit parçacıkları ayıran bir hat olarak görülmektedir. Akışkanlaşma gaz hızı arttırıldıkça ölü bölge alanı da azalmaktadır. Üç farklı akışkanlaşma hızı değeri ( $U_f = 3.58, 4.92$  ve  $6.24$  m/s) kullanılarak yapılan deneylerin sonuç ve gözlemleri ışığında ölü bölgeyi gidermek için çok yüksek akışkanlaşma hava hızlarına gerek olmadığı belirlenmiş ve bu değerlerin yaklaşık 4-5 m/s civarında olmasının yatağın halka bölgesinin tümünü hareketlendirmeye yettiği gözlemlenmiştir.

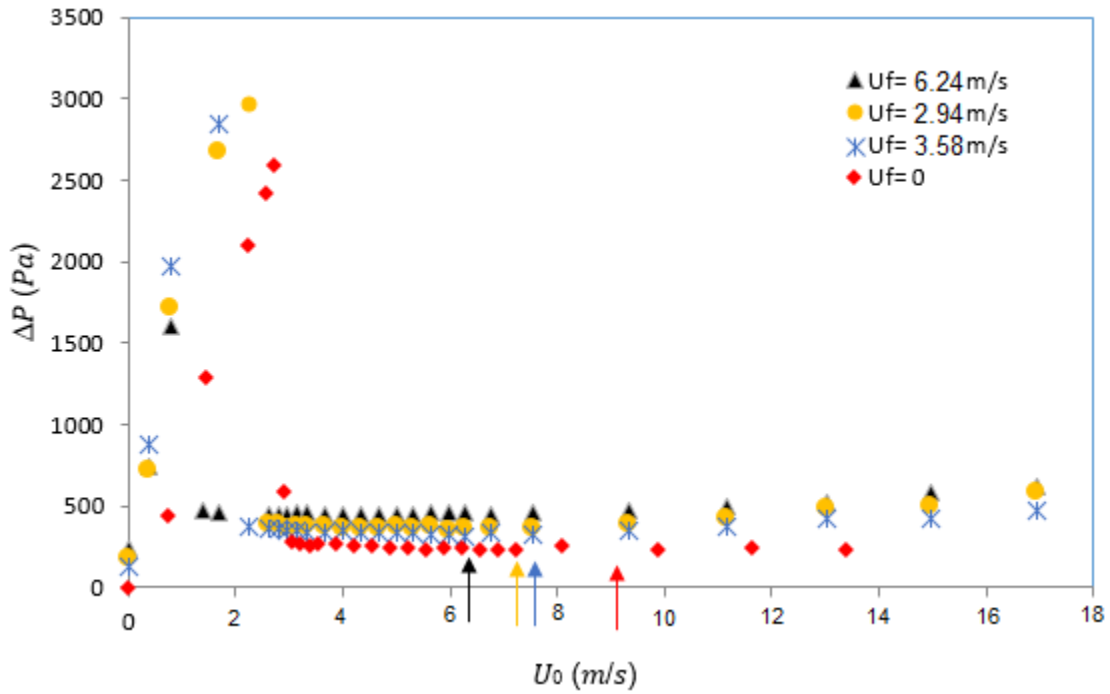


**Şekil 4.19.** 60 derecelik yatak için 4 farklı akışkanlaşma hızlarında ölü bölgelerin durumu (Kırmızı delikli çizgilerin içindeki alan ölü bölgeleri göstermektedir)

**Şekil 4.20'**de farklı akışkanlaşma gaz hızlarında ( $U_f = 0, 3.58, 4.92$  ve  $6.24$  m/s) taşkınlaşma gaz hızı arttırılarak yapılan yatak basınç düşüşü deneylerinin sonuçları verilmiştir. Bu deneyler sırasında gözlemlenen minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızları ( $U_{ms,s}$ ) ise oklarla şekil üstünde belirtilmiştir. Taşkınlaşma gaz hızı arttırıldığında minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızı ciddi bir biçimde düşmektedir. Dolayısıyla taşkın-akışkan yataklarda, taşkın yataklara göre daha düşük taşkınlaşma hızlarında yatağın kararlı taşkınlaşma rejiminde işletilmesi mümkün olmaktadır. Konik yanal alandan yatağa beslenen akışkanlaşma havası ile halka bölgesi minimum akışkanlaşma koşullarına getirilmekte, ölü bölgeler ortadan kalkmakta ve parçacıkların yatağın

tabanına doğru hareketleri kolaylaşmaktadır. Bu da düzgün ve kararlı bir fıskiye oluşumunu sağlamaktadır.

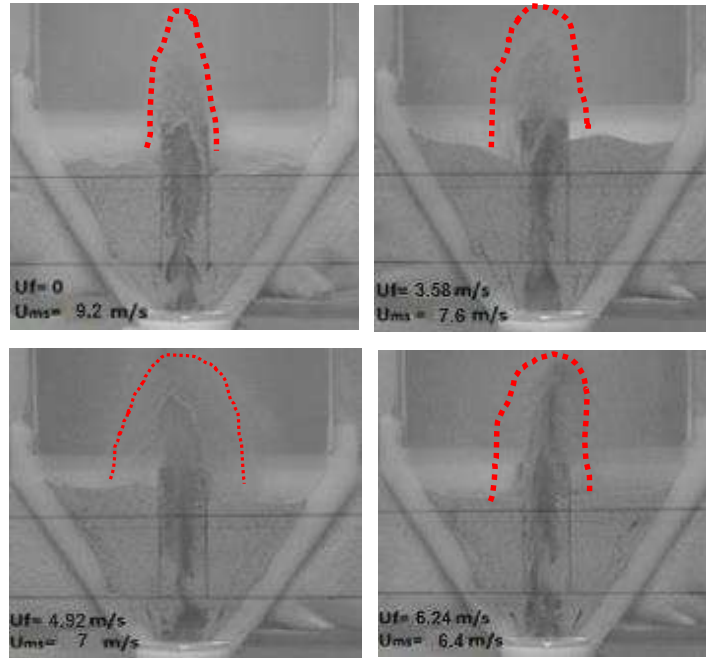
**Çizelge 4.12** minimum kararlı taşkınlaşma hızının akışkanlaşma hızına göre değişimini ve taşkın yatak koşuluna göre toplam hava miktarındaki değişimi vermektedir. Taşkın yatak koşulunda 9.2 m/s olan minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızı, akışkanlaşma hızının 6.24 m/s olduğu durumda 6.4 m/s değerine düşmekte, buna karşın yatağa giren toplam gaz debisi %37 artmaktadır. Yatağa giren gaz debisi kurutma gibi ekonomik performansı gaz debisine bağlı olan bir fiziksel işlem için dikkatlice irdelenmesi gereken bir parametredir. Dolayısıyla taşkın-akışkan yatak işleminde yatakdaki gaz-katı temasını uygun bir biçimde sağlayacak ve ölü bölgeleri kaldıracak en düşük akışkanlaşma gaz hızının kullanılması ekonomik açıdan önemlidir.



**Şekil 4.20.** Artan taşkınlaşma gaz hızlarında ( $U_0$ ) yatak basınç düşüşü ölçümleri,  $\gamma = 60^\circ$ . ( $U_{ms,s}$  değerleri oklarla gösterilmiştir).

**Çizelge 4.12.**  $U_{ms,s}$  değerinin  $U_f$  değeri ile değişimi,  $\gamma = 60^\circ$

$U_f$ (m/s)	$U_{ms}$ (m/s)	Toplam hava debisindeki artış ( $U_f = 0$ 'a göre)
0	9.2	0
3.58	7.6	% 21.5
4.92	7.0	%30
6.24	6.4	% 37



**Şekil 4.21.** Çizelge 4.12'deki koşullar için artan hava hızlarında minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları,  $\gamma = 60^\circ$ .

**Şekil 4.21'de Çizelge 4.12'deki koşullar için minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları verilmiştir.** Akışkanlaşma gazının beslenmesiyle fiskiye bölgesinin çapı artmış, daha düzgün dağılan bir fiskiye elde edilmiştir.

#### 4.3.2 30 Derecelik Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatak ile İlgili Deney Sonuçları

60 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatakla yapılan deneyler, konik açının etkisini belirlemek ve kurutucu için uygun konik açığı seçmek amacıyla 30 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatakla da tekrarlanmıştır. 30 derecelik konik açılı yatak ile 60 derecelik konik açılı yatağın deneysel karşılaştırması iki farklı durum için yapılmıştır:

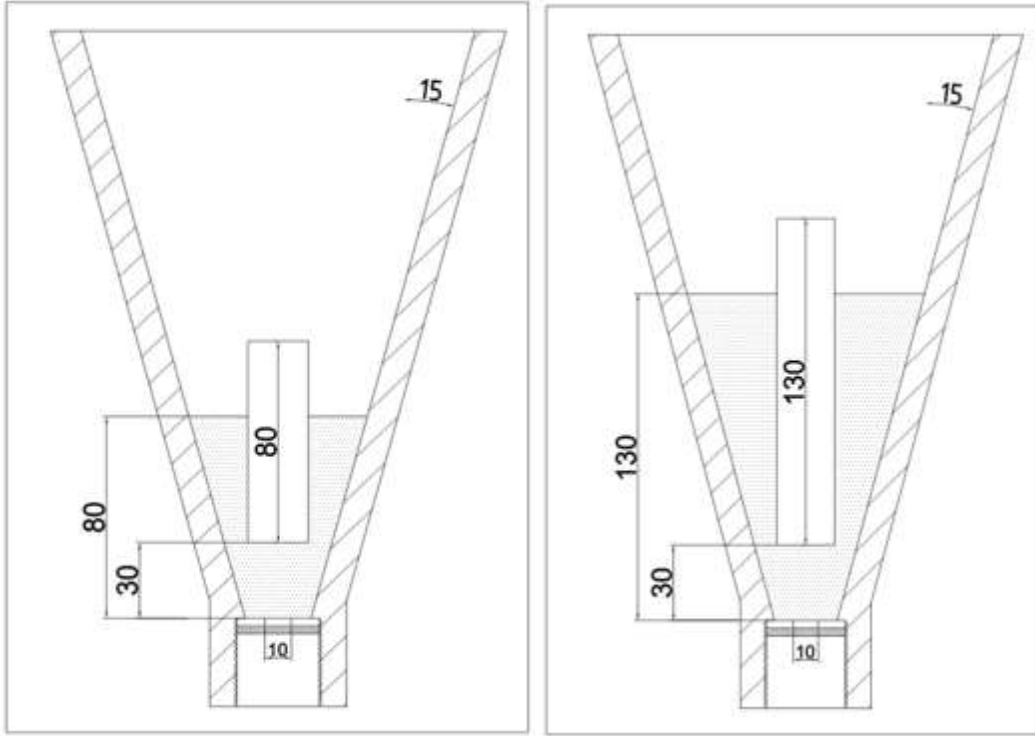
- Aynı statik yatak yüksekliği (80 mm), farklı yatak malzemesi ağırlıkları (160 gr 60 derece için, 68 gram 30 derece için)
- Aynı yatak malzemesi ağırlığı (160 gr), farklı statik yatak yükseklikleri (80 mm 60 derece için, 130 mm 30 derece için)

Konik açısının farklılığından dolayı statik yatak yüksekliği sabit tutulduğunda (80 mm), 30 derece için kullanılması gereken malzeme miktarı 68 gr olmaktadır. 30 derecelik yatakda statik yatak yüksekliğinin üstünde kalan yan alandaki delikler bantlanarak kapatılmıştır.

İkinci karşılaştırma ise aynı malzeme ağırlığında (160 gr) yapılmıştır. Bu durumda 30 derecelik yataktaki statik yatak yüksekliği 130 mm olmaktadır. Bu durumda akış borusunun da yüksekliğinin arttırılması gerekmiş, 130 mm uzunluğunda yeni bir akış borusu kullanılmıştır. Aynı biçimde konik duvar bölgesindeki deliklerin statik yatak yüksekliğinin üstünde kalan bölümü bantlanarak kapatılmıştır.

30 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatağın geometrik ölçüleri ve deney koşulları aynı statik yatak yüksekliği ve yatak malzemesi ağırlığı durumları için **Şekil 4.22** ve **Çizelge 4.13**'de verilmiştir.





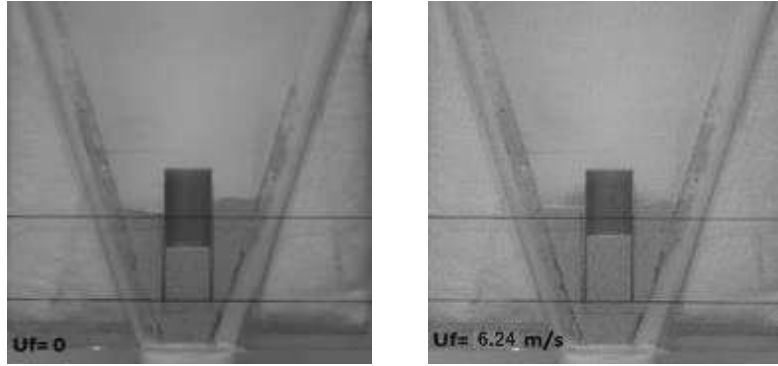
**a)** Aynı statik yatak yüksekliği (80 mm) **b)** Aynı yatak malzemesi ağırlığı (160 gr)

**Şekil 4.22.** Yarım yatak ölçüleri ( $\gamma = 30^\circ$ )

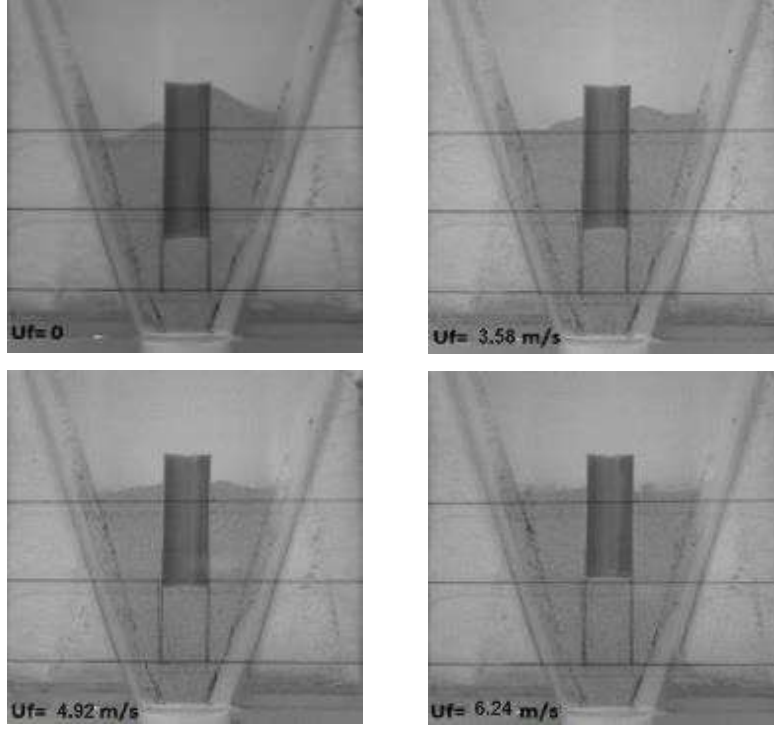
**Çizelge 4.13.** Deney koşulları ( $\gamma = 30^\circ$ )

Parametreler	Değerler Aynı statik yatak yüksekliği (80 mm)	Değerler Aynı yatak malzemesi ağırlığı (160 gr)
Konik Açısı	$30^\circ$	$30^\circ$
Akış Borusu Yüksekliği	80 mm	130 mm
Akış Borusu İç Çapı	23 mm	23 mm
Akış Borusunun Yatak Girişinden Yüksekliği	30 mm	30 mm
Statik Yatak Yüksekliği	80 mm	130 mm
Taşkın Hava Giriş Çapı	10 mm	10 mm
Malzeme Ağırlığı	68 gr	160 gr

**Şekil 4.23** ve **Şekil 4.24**'de farklı akışkanlaşma gaz hızları ile yapılan deneylerin sonundaki (taşkın ve akışkanlaşma gaz hızları kesildikten sonra) yatak malzemesinin son hali gösterilmiştir. **Şekil 4.23** 80 mm yatak yüksekliği, **Şekil 4.24** ise 160 gr yatak malzemesi ağırlığı koşullarındaki fotoğrafları göstermektedir. Her iki koşulda da 30 derece konik açısı için duvar bölgelerine yakın kısımlarda akışkanlaşma gazı verilmediği durumda bile ölü bölge gözlemlenmemiş (60 derecede oluşan siyah çizgiler) ve işlem sırasında halka bölgesindeki parçacıkların yatak girişine doğru hareket ettikleri izlenmiştir. Dolayısıyla 30 derece konik açıda mikronize zeolit parçacıklarının taşkın yatakda işlemi mümkündür. Fakat taşkın-akışkan yatağın gaz-katı teması ve parçacık dolaşımı açısından daha avantajlı olacağı ve kurutma zamanını önemli ölçüde azaltacağı öngörülmektedir.



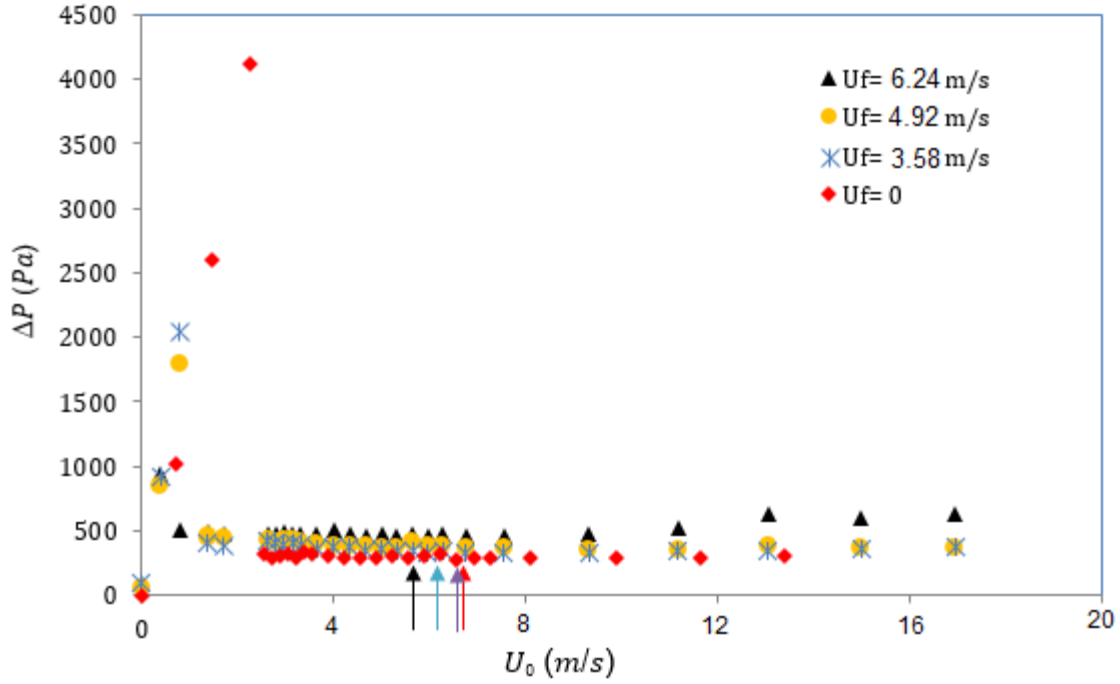
**Şekil 4.23.** 30 derecede ölü bölgelerin durumu,  $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği.



**Şekil 4.24.** 30 derecede ölü bölgelerin durumu,  $\gamma = 30^\circ$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı.

**Şekil 4.25'**de farklı akışkanlaşma gaz hızlarında ( $U_f = 0, 3.58, 4.92$  ve  $6.24$  m/s) taşkınlaşma gaz hızı artırılarak yapılan yatak basınç düşüşü deneylerinin sonuçları verilmiştir. Bu deneyler sırasında gözlemlenen minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızları ( $U_{ms,s}$ ) ise oklarla şekil üstünde belirtilmiştir. Taşkınlaşma gaz hızı artırıldığında minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızı düşmektedir. Fakat bu düşüş 60 derecelik yatak sonuçları ile karşılaştırıldığında daha az düzeydedir. Dolayısıyla 60 dereceye kıyasla, 30 derecelik yatakda aynı yatak yüksekliğinde yapılan deneylerde akışkanlaşma gazının minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızına etkisi daha azdır. Aynı statik yatak yüksekliğinde 30 derecede elde edilen minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızları 60 dereceye göre oldukça düşüktür. Bu taşkın yataklarda bilinen bir eğilimdir.

**Çizelge 4.14** minimum kararlı taşkınlaşma hızının akışkanlaşma hızına göre değişimini ve taşkın yatak koşuluna göre toplam hava miktarındaki değişimi vermektedir. Taşkın yatak koşulunda 3 m/s olan minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızı, akışkanlaşma hızının 6.24 m/s olduğu durumda 5 m/s değerine düşmekte, buna karşın yatağa giren toplam gaz debisi % 87 artmaktadır. Taşkın-akışkan yatak durumuna geçiş ile birlikte toplam debideki artış 60 dereceye göre oldukça yüksektir.

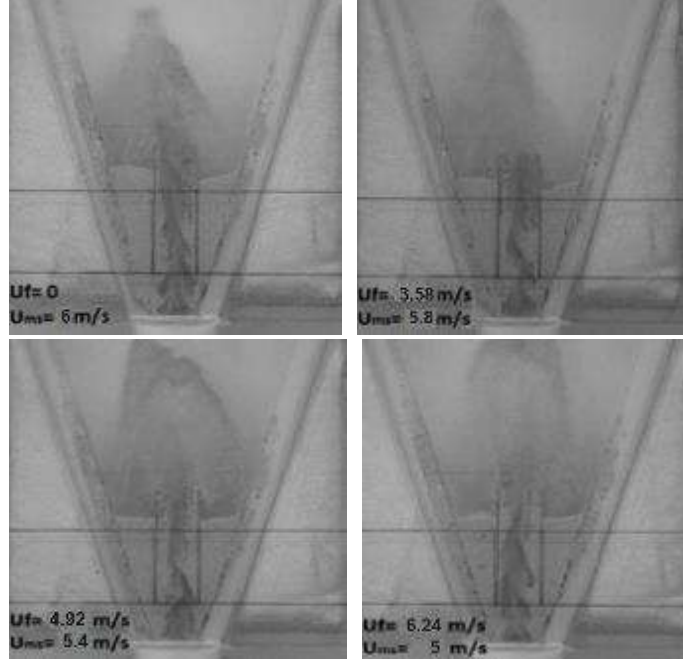


**Şekil 4.25.** Artan taşkınlaşma gaz hızlarında ( $U_0$ ) yatak basınç düşüşü ölçümleri,  $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği. ( $U_{ms,s}$  değerleri oklarla gösterilmiştir)

**Çizelge 4.14.**  $U_{ms,s}$  değerinin  $U_f$  değeri ile değişimi,  $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği.

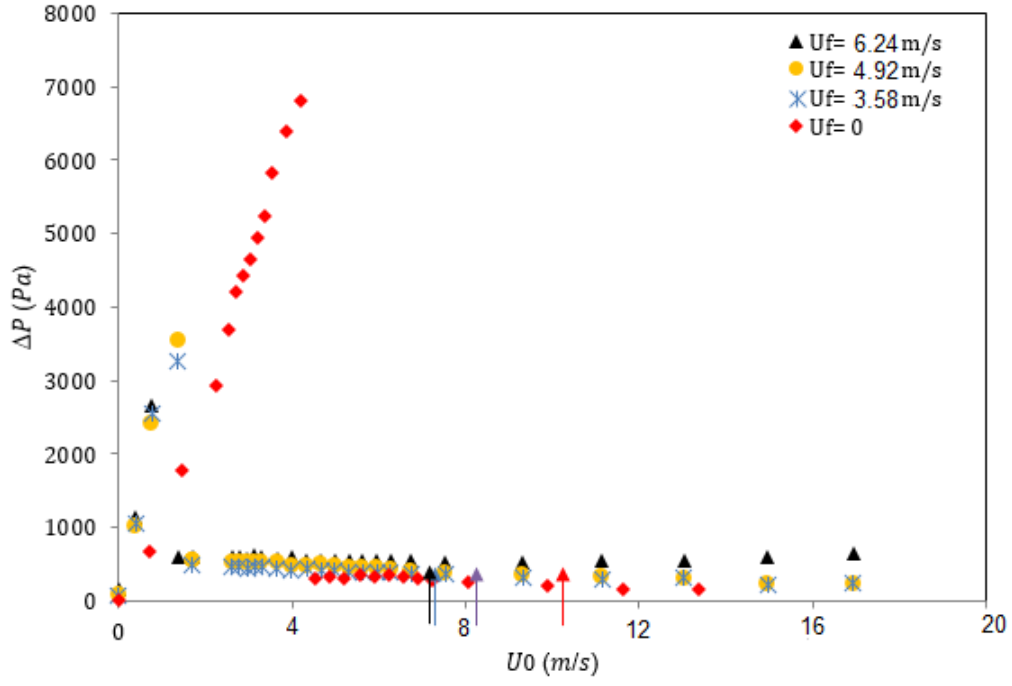
$U_f$ (m/s)	$U_{ms,s}$ (m/s)	Toplam hava debisindeki artış ( $U_f = 0$ 'a göre)
0	6	0
3.58	5.8	% 56
4.92	5.4	% 72
6.24	5	% 87

**Şekil 4.26'da Çizelge 4.14'deki** koşullar için minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları verilmiştir. Tüm koşullarda ölü bölge gözlenmemiş ve kararlı taşkınlaşma gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.26.** Çizelge 4.14'deki koşullar için artan hava hızlarında minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları,  $\gamma = 30^\circ$ , 80 mm yatak yüksekliği.

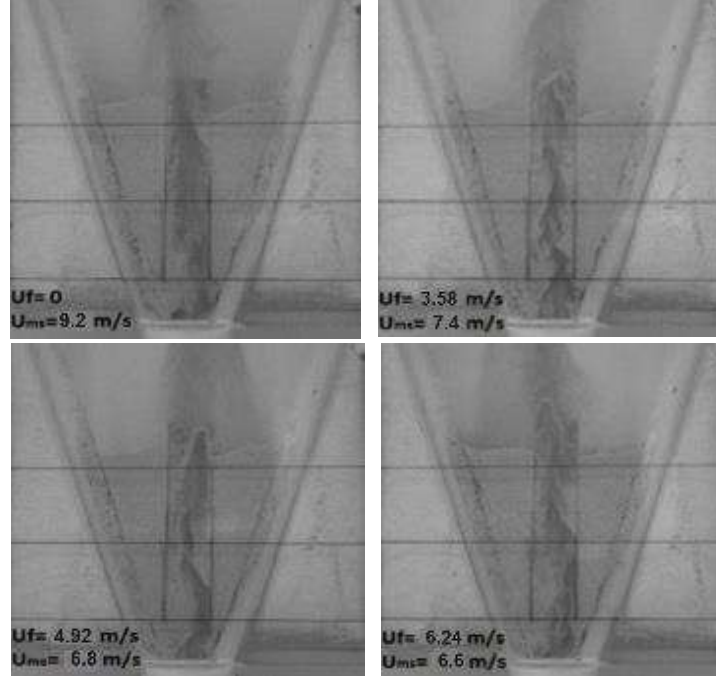
Daha öncede belirtildiği gibi ikinci tip deneyler ve karşılaştırma yatak malzemesi ağırlığı 30 ce 60 derecelik yataklar için aynı tutularak yapılmıştır. 30 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yatakda 160 gr ağırlığındaki yatak malzemesi ile yapılan deneylerin sonuçları tartışılmıştır. Statik yatak yüksekliği 130 mm'dir. **Şekil 4.27'**de farklı akışkanlaşma gaz hızlarında ( $U_f = 0, 3.58, 4.92$  ve  $6.24$  m/s) taşkınlaşma gaz hızı arttırılarak yapılan yatak basınç düşüşü deneylerinin sonuçları verilmiştir. Bu deneyler sırasında gözlemlenen minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızları ( $U_{ms,s}$ ) ise oklarla şekil üstünde belirtilmiştir. Taşkınlaşma gaz hızı arttırıldığında minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızı ciddi bir biçimde düşmektedir. **Çizelge 4.15'**den taşkın yatak koşulunda  $9.2$  m/s olan minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızının, akışkanlaşma hızının  $6.24$  m/s olduğu durumda  $6.6$  m/s değerine düştüğü, buna karşın yatağa giren toplam gaz debisinin % 40 oranında arttığı görülmektedir. Bu değerler 60 derecedeki sonuçlara çok yakındır.



**Şekil 4.27.** Artan taşkınlaşma gaz hızlarında ( $U_0$ ) yatak basınç düşüşü ölçümleri,  $\gamma = 30^\circ$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı. ( $U_{ms,s}$  değerleri oklarla gösterilmiştir)

**Çizelge 4.15.**  $U_{ms,s}$  değerinin  $U_f$  değeri ile değişimi,  $\gamma = 30$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı.

$U_f$ (m/s)	$U_{ms,s}$ (m/s)	Toplam hava debisindeki değişim ( $U_f = 0$ 'a göre)
0	9.2	0
3.58	7.4	% 19
4.92	6.8	% 27
6.24	6.6	% 40



**Şekil 4.28.** Çizelge 4.15'deki koşullar için artan hava hızlarında minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları,  $\gamma = 30^\circ$ , 160 gr yatak malzemesi ağırlığı.

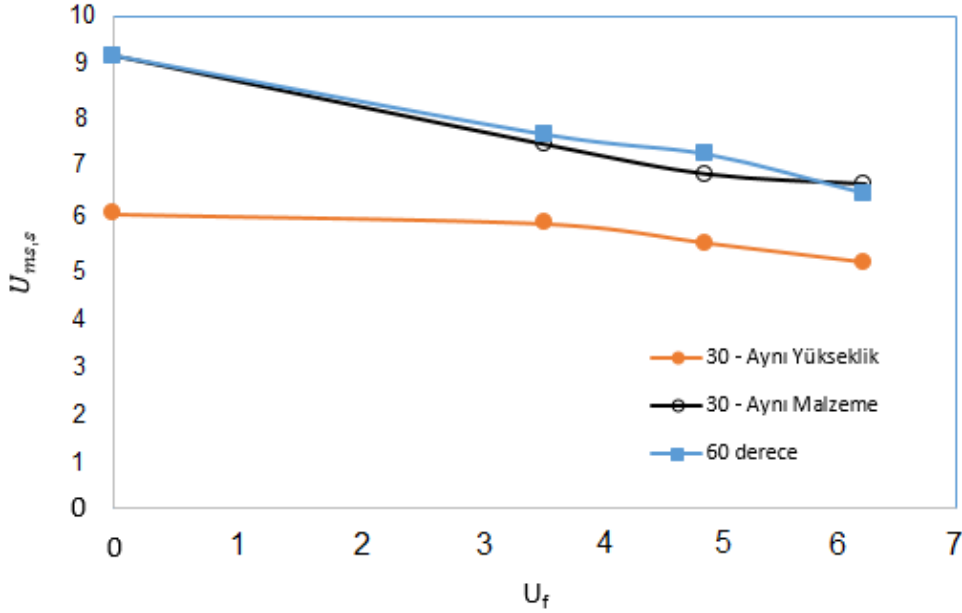
**Şekil 4.28'de Çizelge 4.15'deki** koşullar için minimum kararlı taşkınlaşma durumundaki yatağın fotoğrafları verilmiştir. Tüm koşullarda ölü bölge gözlenmemiş ve kararlı taşkınlaşma gözlemlenmiştir.

#### 4.3.3 30 ve 60 Derecelik Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatakların Karşılaştırılması

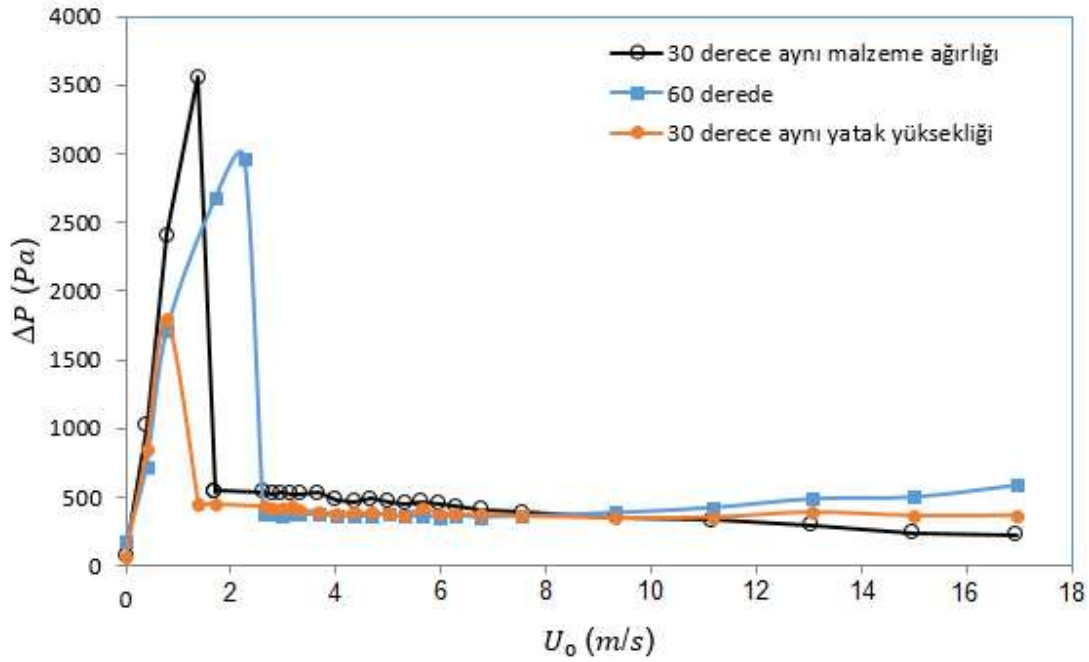
**Şekil 4.29'da** minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızının akışkanlaşma gaz hızı ile değişimi 30 ve 60 derecelik yataklar için verilmiştir. 30 derecelik yatakda 60 derecelik yatağa eşdeğer malzeme kullanıldığı zaman (160 gr), minimum kararlı taşkınlaşma hızlarında bir farklılık görülmemiştir. Aynı yatak yüksekliği durumunda ise, 30 derecelik yatakda daha düşük kararlı taşkınlaşma gaz hızları ölçülmüştür. Endüstriyel uygulamalar göz önüne alındığında işleme giren malzeme miktarı performans değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametredir. Dolayısıyla, farklı iki açının aynı malzeme miktarında karşılaştırılmasının daha doğru olduğu öngörülmüştür.

**Şekil 4.30'da** yatak basınç düşümünün değişimi 30 ve 60 derecelik yataklar için 4.92 m/s akışkanlaşma gazı hızı için verilmiştir. Kararlı taşkınlaşma bölgesinde 30 derecelik 160 gr malzemesine sahip (130 mm statik yatak yüksekliği) taşkın-akışkan yatakda, diğer koşula (30

derece, 80 mm statik yatak yüksekliği) ve yatağa göre (60 derece, 80 mm yatak yüksekliği) biraz daha yüksek basınç düşümü elde edilmiştir. Akış borusuz taşkın yataklarda aynı açıda yatak basınç düşümünün statik yatak yüksekliği ile arttığı bilinmektedir.



**Şekil 4.29.** Minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızının akışkanlaşma gaz hızı ile değişimi.



**Şekil 4.30.** Yatak basınç düşümünün artan taşkınlaşma gazı hızı ile değişimi ( $U_f = 4.92$  m/s)



Sonuç olarak;

- 30 ve 60 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilen basınç düşümü, minimum kararlı taşkınlaşma hızı ve hızlı kamera ölçümleri, aynı yatak malzemesi ağırlığında 30 ve 60 derecelik yatakların birbirlerine yakın minimum kararlı taşkınlaşma hızına sahip olduklarını göstermiştir. Dolayısıyla iki açıda için kullanılabilecek olan taşkınlaşma ve akışkanlaşma gaz hızları birbirlerine yakındır. 30 derecelik yatakda, aynı yatak malzemesi ağırlığı kullanıldığı durumda, 60 derecelik yatağa göre kararlı bölge yatak basınç düşümü biraz daha fazladır.
- Akışkanlaşma hızının artırılması, minimum kararlı taşkınlaşma hızını azaltmaktadır. Buna karşın yatak basınç düşümü artmaktadır. Dolayısıyla yatakdaki ölü bölge oluşumunu engelleyecek en düşük akışkanlaşma hızının kullanılması önerilmektedir. Bu hız 4-5 m/s aralığındadır.
- Yukarıdaki genel sonuçların ışığında, 30 ve 60 derecelik açılı yataklar aynı malzeme ağırlığında gaz hızları ve basınç düşümü açısından birbirlerine yakın performans göstermektedir. Buna karşın hızlı kamera ölçümleri ve deneyler sırasında yapılan gözlemler, 30 derecelik açıda hiç bir koşulda ölü bölge oluşmadığını, parçacık hareketinin özellikle halka bölgesinde çok daha hızlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu tasarımı için 30 derecelik konik açının kullanılmasına karar verilmiştir.

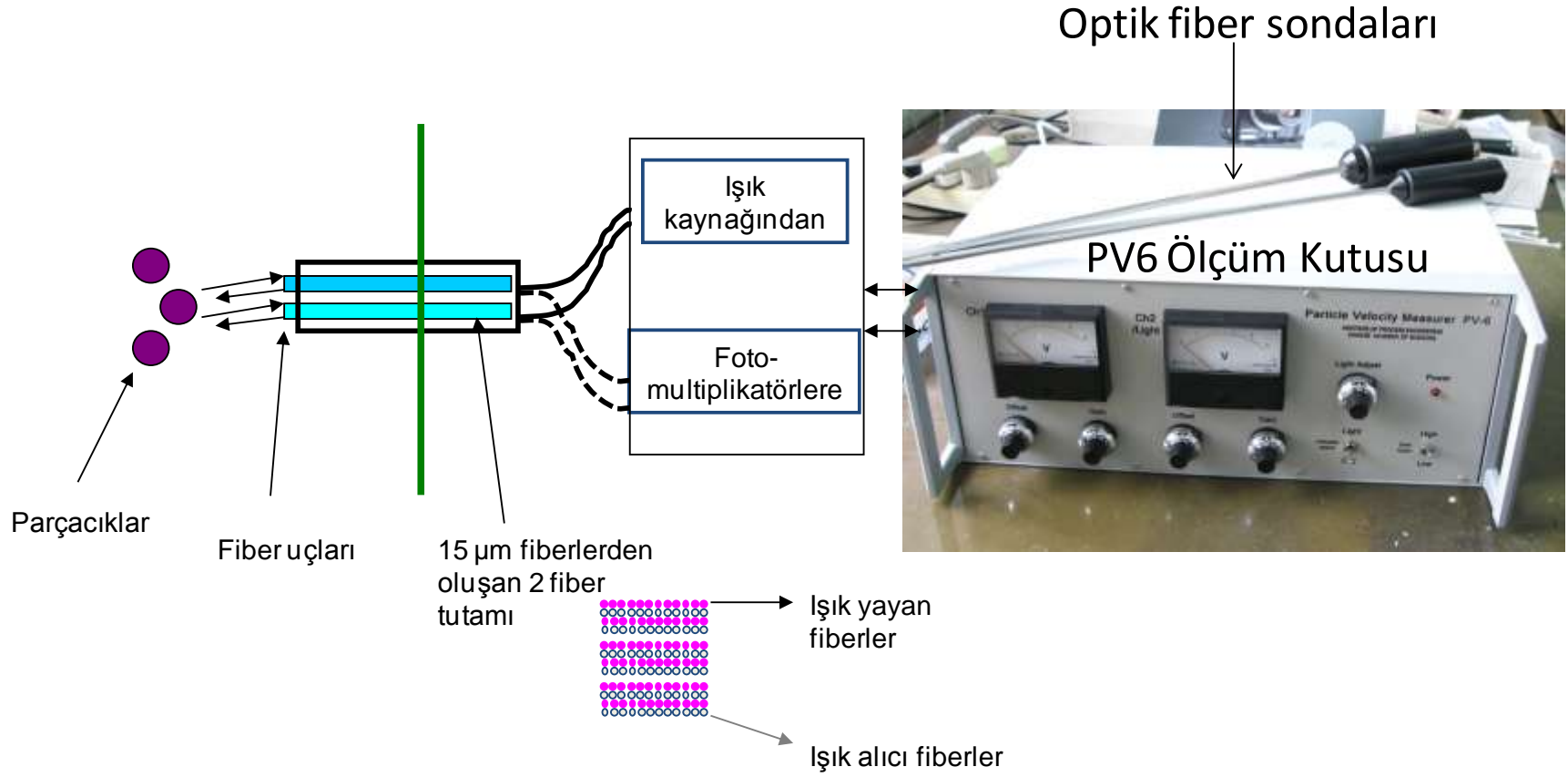
## 4.4 Parçacık Konsantrasyonu lmleri

Mikron boyutundaki nem oranı yüksek parçacıkların en verimli ve ekonomik biçimde kurutulmasını sağlamak için kurulacak olan akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu sisteminin tasarımı için genel hidrodinamik özelliklerin bilinmesinin yanı sıra detaylı olarak yatak içinde lokal parçacık konsantrasyonlarının da bilinmesi gerekmektedir. Konik-silindirik taşkın yataklarda lokal parçacık konsantrasyonları (San Jose vd., 1998; Olazar vd., 1998; San Jose vd., 1998(b); Olazar vd., 1998(a); Olazar vd., 2005; Sari vd., 2011) taşkın (spout) ve halka (annulus) bölgelerinde fiber optik sonda ile ölçülmüştür. Bu alışmalar, halka bölgesinde duvardan taşkın bölgeye kadar boşluk değerlerinin değiştiğini göstermiştir. Bu alışmalar yoğunlukları 65-6500 kg/m<sup>3</sup> arasında, çapları ise 0.5 - 3 mm arasında değişen parçacıklar ile gerçekleştirilmiştir. Ancak mikron boyutunda parçacıklarla çalışan taşkın-akışkan yataklarda parçacık konsantrasyonu konusunda literatürde bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bölümde, soğuk taşkın-akışkan yatak sisteminde zeolit parçacıkları ile fiber optik sonda sistemi kullanılarak gerçekleştirilen parçacık konsantrasyonu ölçümleri verilmektedir.

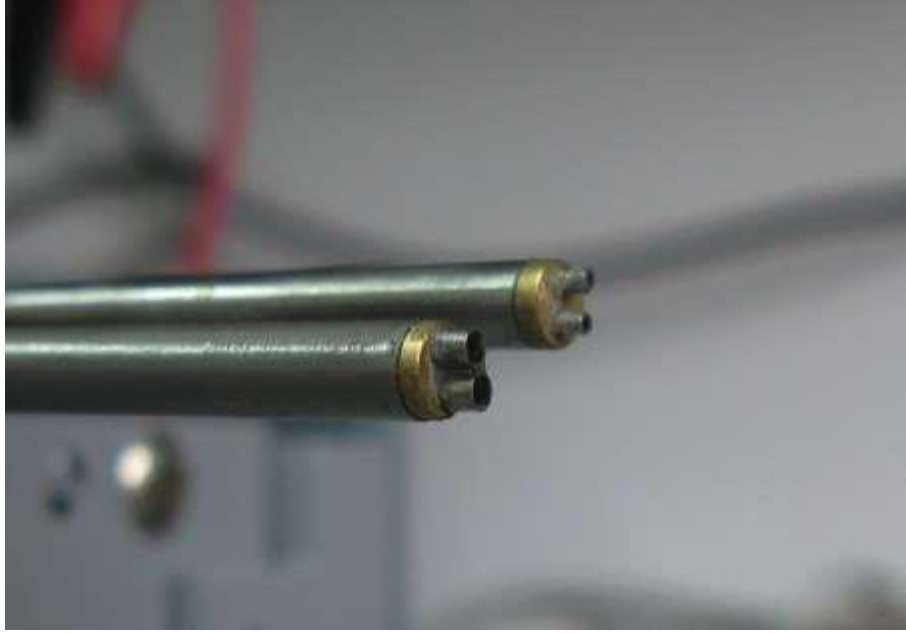
### 4.4.1 Sistem Hakkında Genel Bilgi

Parçacık konsantrasyonu ölçmek için kullanılan fiber optik sonda sisteminin şekli **şekil 4.31**'de verilmektedir. PV-6 isimli bu sistem University of British Columbia (Kanada) Akışkanlaşma Araştırma Merkezi tarafından tasarlanmış ve Institute of Process Engineering tarafından in'de üretilmiştir. Sistem ışık yayabilen ve alabilen fiberler geçen iki adet sondadan (farklı parçacık çaplarında kullanılmak üzere) ve gelen ışık sinyallerini işleyebilecek bir veri toplama kutusu ve yazılımından oluşmaktadır. Bu sondalar yatağa istenilen yükseklikte sokulabilmekte ve yatağın herhangi bir bölgesindeki parçacık konsantrasyonunu ölçebilmektedir.

Fiber optik sistemin sondaları özel olarak zeolit parçacıkları için tasarlanmıştır. Sonda içindeki fiberlerin sayıları ve büyüklükleri zeolit parçacıklar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu çalışmada iki farklı sonda satın alınmıştır. Bu sondaların fotoğrafı **şekil 4.32** 'de verilmektedir. Sondalardan biri, 4 mm dış çapa, 400 mm uzunluğa sahip olup, içinde 0.4 x 0.4 mm'lik fiber demeti vardır. Diğeri ise, 5 mm dış çapa, 400 mm uzunluğa sahip olup, içinde 1.1 x 1.1 mm'lik fiber demeti vardır. **şekil 4.31**'de görülebileceği gibi optik sonda içinde 15 m fiberlerden oluşan iki fiber demeti vardır ve her demetin içinde de ışık yayan ve ışık alıcı fiberler birbirine yapışık ve sıra sıra dizilmişlerdir.



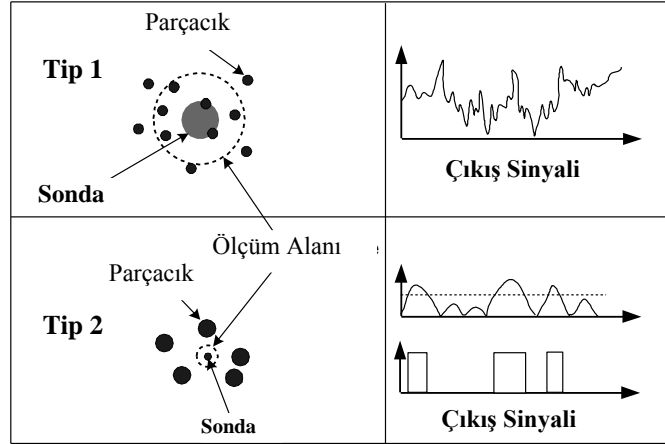
**Şekil 4.31.** PV6 parçacık hız/konsantrasyon ölçüm sistemi



**Şekil 4.32.** Proje kapsamında kullanılacak olan optik sondaların uç kısımlarının fotoğrafı

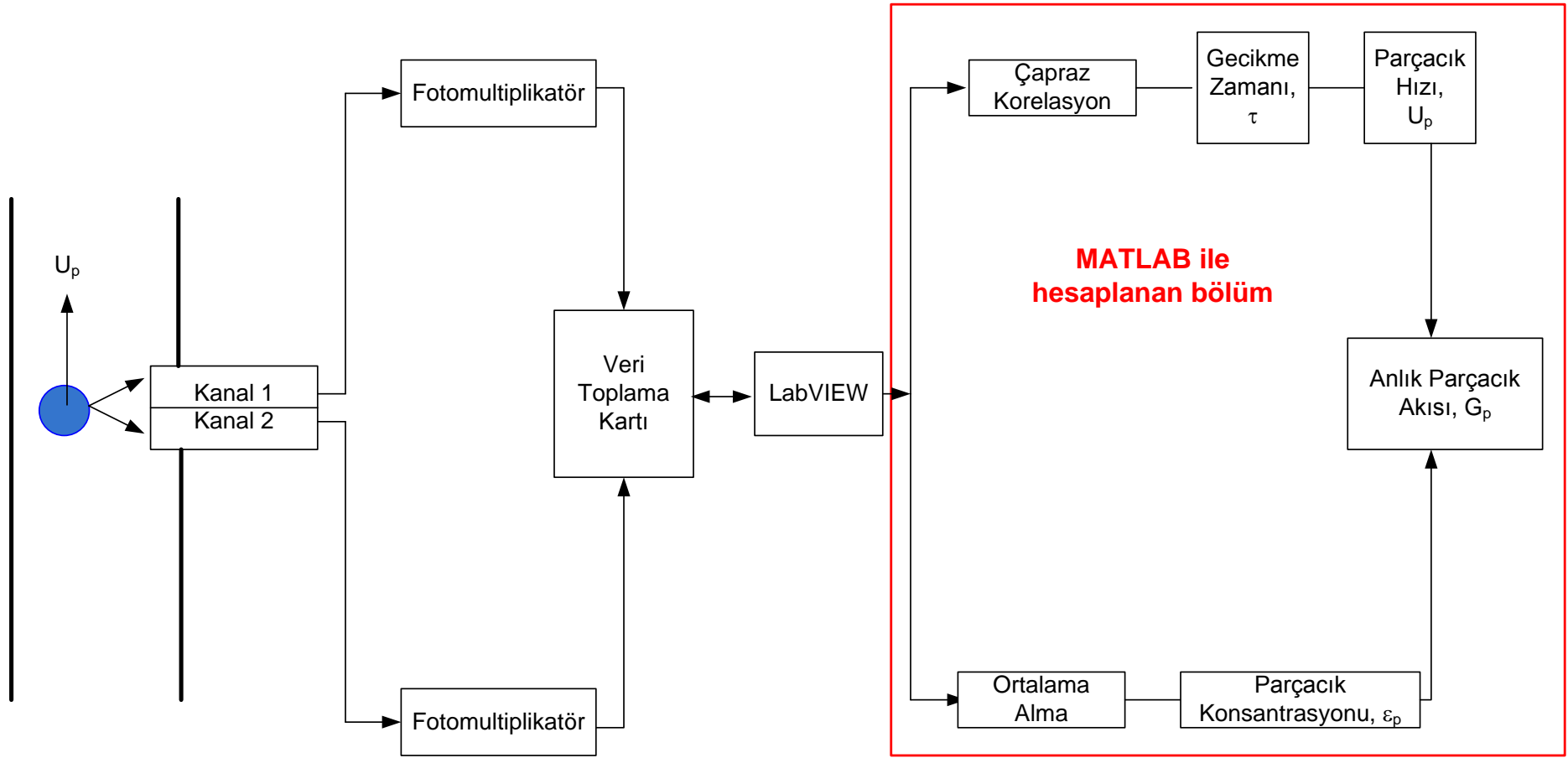
Akışkan yataklarda yapılan ölçümlerde genelde iki tip fiber optik sonda kullanıldığı görülmektedir.

**Şekil 4.33'**de görülebileceği gibi birinci tip sondalar genellikle birçok fiber içerir ve sonda ucu büyüklüğü parçacık boyutundan çok daha büyüktür. Bu tip sondalarla parçacıklar grup halinde fark edilebildikleri için genellikle parçacık konsantrasyon ölçümlerinde kullanılırlar. İkinci tip sondalar ise, uçları parçacık boyutundan daha küçük olduğu için tek tek parçaları fark edebilirler. Dolayısıyla, bu tip sondalar parçacık hızı ölçümlerinde tercih edilmektedirler. Bu çalışmada kullanılacak olan sondalar ise, hem küçük çaplı fiberlerin olmasından dolayı parçacık hızı ölçümlerinde hem de birçok fiber içermesinden dolayı parçacık konsantrasyonu ölçümlerinde kullanılabilinecek tasarıma sahiptirler. Ancak bu çalışmada sadece parçacık konsantrasyonu ölçümlerinin yapılması öngörülmüştür.



**Şekil 4.33.** Sonda tipleri: Tip I: Parçacık boyutu << sonda çapı; Tip II: Parçacık boyutu > sonda çapı.

**Şekil 4.34**'te parçacık hız/konsantrasyon sistemi şematik olarak gösterilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi, sistemden gönderilen ışık parçacıklara çarptıktan sonra sisteme geri yansımakta ve ışık alıcı fiberler tarafından alınıp her iki fiber tutamı için ayrı fotomultiplikatöre yollanmaktadır. Daha sonra bu analog sinyal veri toplama sistemi (DAQ) tarafından dijital hale getirilerek LabVIEW® ticari yazılımına iletilmektedir. LabVIEW® programı içerisindeki ölçme frekansı ve süresi ayarlanarak bu sinyaller iki kolon halinde kaydedilmektedir. Bu elde edilen veriler, kalibrasyon denkleminin kullanıldığı MATLAB® programı yardımıyla işlenip, parçacık konsantrasyonu hesaplanmaktadır. Fiber optik sonda ile birlikte bir yazılım (PV6De programı) da yollanmıştır. Ancak yapılan ön çalışmalarda bu yazılımın taşkın yatak koşullarında veri toplama frekansı, veri toplama sayısı ve veriyi işleme bakımından yetersiz olduğu belirlendiğinden bu program yerine, yeni yazılan LabVIEW® ve MATLAB® programı kullanılmıştır.



**Şekil 4.34.** Parçacık hızı, konsantrasyonu ve akısı ölçümü aşamaları

#### 4.4.2 Parçacık Konsantrasyonu Tayininde Kullanılan Kalibrasyon Denkleminin Belirlenmesi

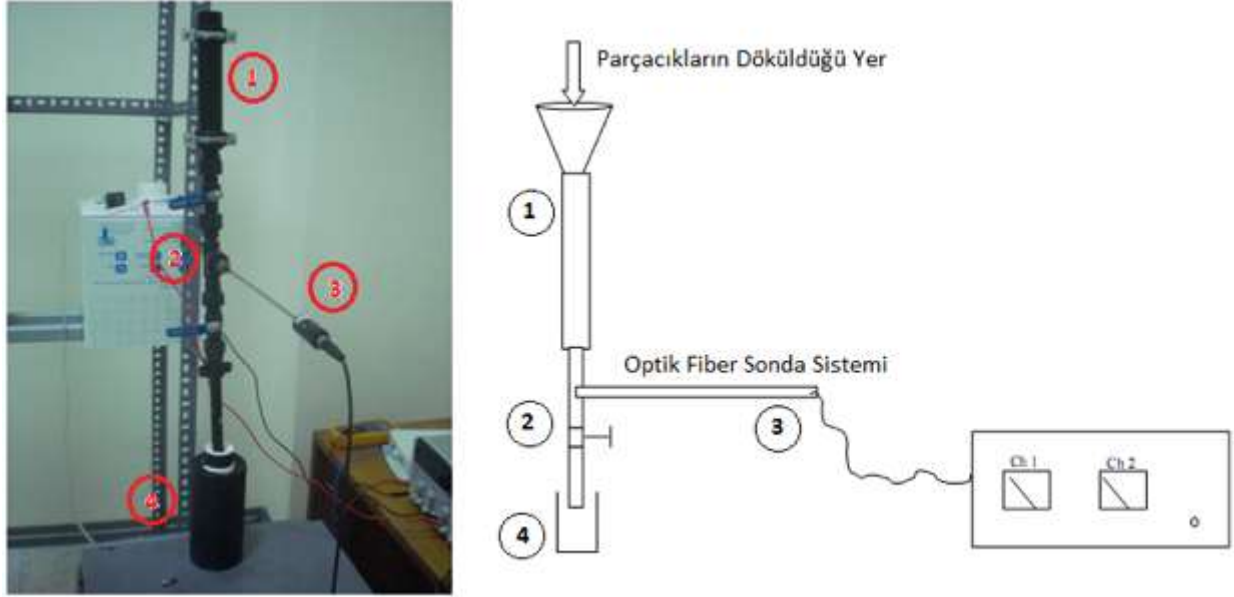
Parçacık konsantrasyonu ölçümü için optik fiber sondanın kalibrasyonuna ihtiyaç vardır. Kalibrasyon işlemi sırasında, fiber optik sondası yardımıyla ölçülen voltaj değerleri ile ölçüm hacmindeki parçacık konsantrasyonu arasında bir bağıntı bulunmaya çalışılmaktadır. Fiber optik sonda sisteminden doğru sonuçlar alınabilmesi için, kalibrasyonun oldukça titizlikle yapılması gerekmektedir.

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde bu kalibrasyon işlemi için birbirinden farklı bir çok yöntem kullanıldığı görülmektedir (Hartge et al., 1986a&b; Werther et al., 1993; Schlichthaerle ve Werther (1999); Nieuwland et al., 1996; Zhou et al., 1994; Liu, 2001; Issangya, 1998; Kirbas, 1994; Wang 2006; Herbert, 1994; Issangya, 1998; Lin et al., 2001; Ellis, 2003). Bunun sebebi heterojen karışımlar için doğru ve tekrarlanabilir kalibrasyon metodu bulmaktaki zorluktur. Bir çok kalibrasyon sıvı-katı sistemleri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistemlerin kullanılmasındaki amaç yüksek konsantrasyonlarda kararlı katı karışımları sağlanabilmesidir. Bu sistemlerde 58 µm çapa sahip kuartz parçacıklar için Hartge et al. (1986a&b) yapılan çalışmalarda, voltaj ile katı konsantrasyonu arasında parçacık konsantrasyonun %50 olduğu duruma kadar lineer bir ilişki olduğu keşfedilmiştir. Aynı çalışmada bu lineer ilişkinin gaz-katı sistemlerde de var olabileceği belirtilmiş ve bu sistemlerde gama ışını soğurma tekniği yardımıyla lineer kalibrasyon denklemi sabitleri elde edilmiştir. Aynı kalibrasyon tekniğinin kullanıldığı Werther et al. (1993), Schlichthaerle ve Werther (1999) ve Nieuwland et al. (1996) çalışmalarında ise Hartge et al. (1986a, 1986b) çalışmalarından farklı olarak lineer olmayan bağıntılar elde edilmiştir.

Damlatma/izleme tekniği Issangya (1998) çalışmasında geliştirilmiş ve Liu (2001) ve Ellis (2003) çalışmalarında kullanılmıştır. Ancak bu yöntem ile yüksek parçacık konsantrasyonunda kalibrasyon yapılırken istikrarlı sonuç elde edilmesinde güçlüklerle karşılaşmaktadır.

Üçüncü bir yöntem olarak ise Kirbas (2004) ve Wang (2006) çalışmalarında katı-katı karışım tekniği kullanılmıştır. Kirbas (2004) çalışmasında ölçümlerde kullanılan FCC parçacığını içeren farklı konsantrasyonlarda FCC+kok kömürü karışımları oluşturulmuş ve **Şekil 4.35'**de sağda gösterilen ve bu projede de benzerinin kurulduğu kalibrasyon sistemini kurmuştur. Bu çalışmada kok kömürü, siyah renkte olması ve siyah rengin görünür ışığın büyük çoğunluğunu soğurması nedeniyle seçilmiştir. Bunun sonucunda ışık sadece FCC parçacığı tarafından yansıtılacak ve kok kömürü boşluk ya da hava gibi davranacaktır. Wang (2006) çalışmasında

ölçüm yapılan parçacık olarak beyaz renkte cam boncuklar kullanılmıştır. Kalibrasyon işlemi için bu cam boncuklar farklı renklerde boyanmış (renk tonları beyazdan siyaha doğru 7 adettir) ve farklı renklerdeki boncuklar ile orijinal cam boncuklar karıştırılarak farklı konsantrasyonda karışımlar elde edilmiştir. Her iki çalışmada da farklı konsantrasyonlarda fiber optik sondadan elde edilen voltaj değerleri ile karışım konsantrasyonları arasında bir bağıntı elde edilmiştir.



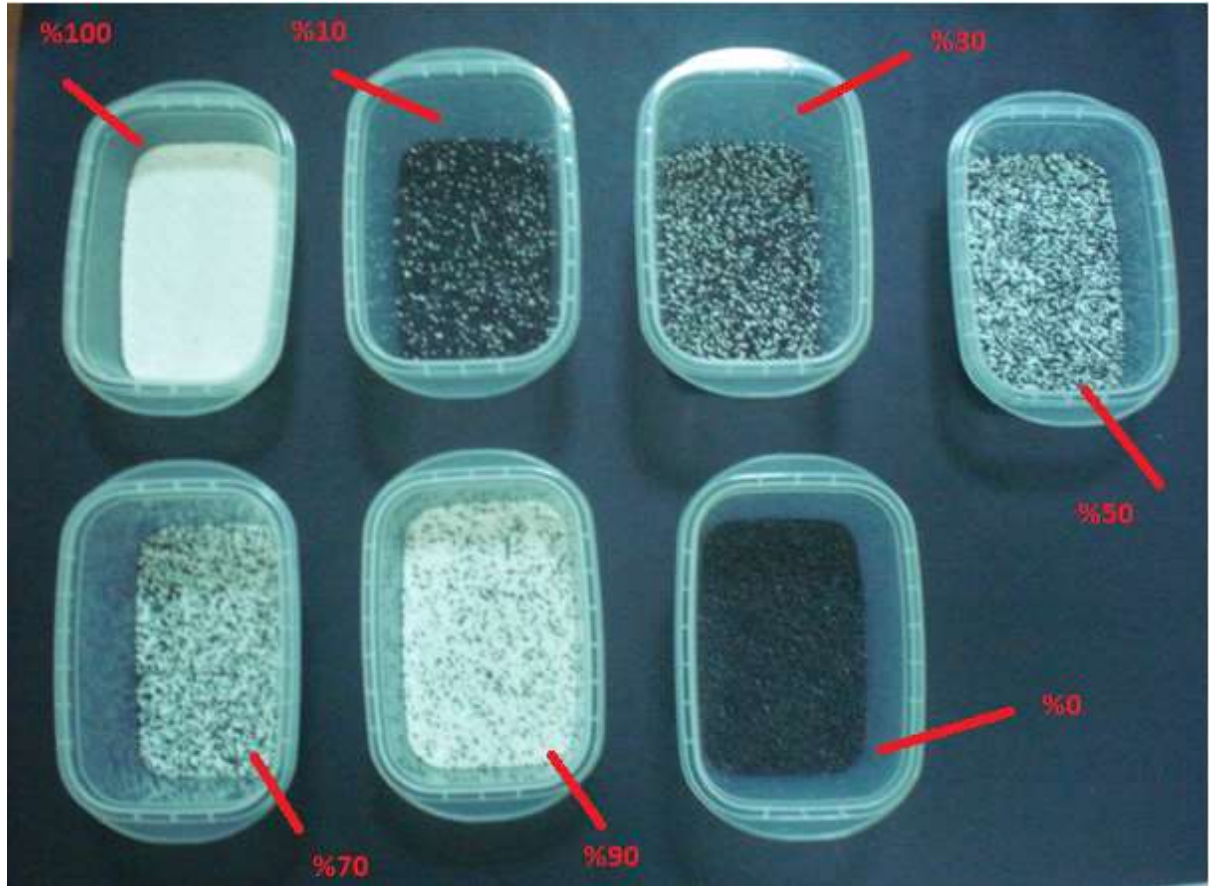
**Şekil 4.35.** Parçacık konsantrasyonu ölçümü için kurulan kalibrasyonu düzeneği

Bu çalışmada fiber optik sonda parçacık konsantrasyonu ölçümü kalibrasyonu için katı-katı karışım metodu kullanılmıştır. Bu kalibrasyon için, küresel zirkon parçacıklarının bir kısmı siyaha boyanmış, bir kısmı ise orijinal halleri ile bırakılmıştır. Bu boyama işlemindeki amaç, Wang (2006) ve Kirbas (2004) çalışmalarındaki amaç ile aynı olarak, siyah parçacıkların görünür ışığın büyük bölümünü absorbe etmesi ve boşluk ya da hava gibi davranmasıdır. Bu şekilde, bu parçacıklar boşluk gibi davranacak sadece orijinal halde kalan parçacıklar ışığı yansıtacaktır. Boyama işleminden sonra 200 gram'lık 7 adet karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar **Şekil 4.36**'da gösterilmektedir. Bu karışımlar hazırlanırken karışımın içindeki orijinal parçacığın kütle oranı dikkatle ölçülmüştür. Bu oranlar **Şekil 4.36**'da da görüldüğü gibi sırasıyla; % 0, 10, 30, 50, 70, 90 ve 100'dür.

Kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için Kirbas (2004)'de kullanılan kalibrasyon düzeneğinin bir benzeri (**Şekil 4.35**) tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu şekil incelendiğinde düzeneğin 3 bölümden oluştuğu görülmektedir. Bu bölümlerden ilki olan 30 mm iç çaplı geniş borunun amacı parçacıkları geniş bir haznede tutmaktır. Parçacıklar 2. bölümde bulunan üst küresel



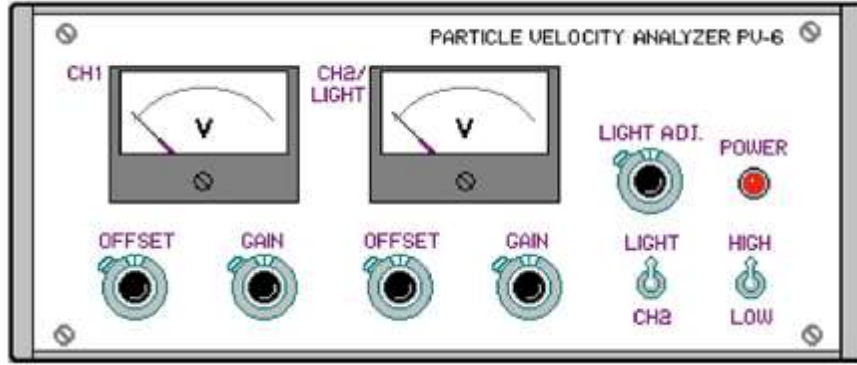
vananın kapatılması ile 1. bölümde muhafaza edilmektedir. 2. bölüm 12 mm iç çaplı bir boru ve bu boruya eklenmiş 2 adet küresel vanadan oluşmaktadır. Ayrıca optik fiber sonda sistemi bu bölüme yerleştirilmiştir. En altta ise 3. bölüm olarak gösterilen yerde siyah kartonla kaplanmış plastik kutu bulunmaktadır. Bu kutu parçacıkları ölçüm sonrasında muhafaza etmektedir. Genel olarak kalibrasyon sistemi siyah boya ile boyanmıştır. Bundaki amaç dışarıdan sisteme gelecek olan ışık etkisini ortadan kaldırmaktır. Bütün kalibrasyon ölçümleri için LabVIEW®'de ölçme frekansı 1 kHz ve örnekleme süresi 1 saniye olarak ayarlanmıştır.



**Şekil 4.36.** Hazırlanan orjinal/siyaha boyanmış parçacık karışımları.

Parçacık konsantrasyonu ölçüm kalibrasyonu iki aşamadan oluşmaktadır. Ölçümlere başlanmadan önce fiber optik sonda sisteminin ışık şiddeti ve ışığı alan kanallarının offset ve gain ayarlamaları **Şekil 4.37'**de gösterilen cihazın ön panelindeki LIGHT ADJ., OFFSET ve GAIN düğmeleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, önce fiber optik sondanın ışık şiddeti **Şekil 4.37'**de gösterilen LIGHT ADJ düğmesi yardımıyla 3 volta getirilmiştir. Daha sonra %0'lık karışım için gevşek dolgulu (loosely packed) durumda ölçümler alınarak OFFSET

düğmesi yardımıyla göstergelerin 1 voltu göstermeleri sağlanmıştır. Daha sonra %100'lük karışım için gevşek dolgulu (loosely packed) durumda ölçümler alınarak GAIN düğmesi yardımıyla göstergelerin 4 voltu göstermeleri sağlanmıştır. Bu offset ve gain ayarlamalarına fiber optik sondanın her iki kanalının volt değerleri değişmeyinceye kadar devam edilmiştir.



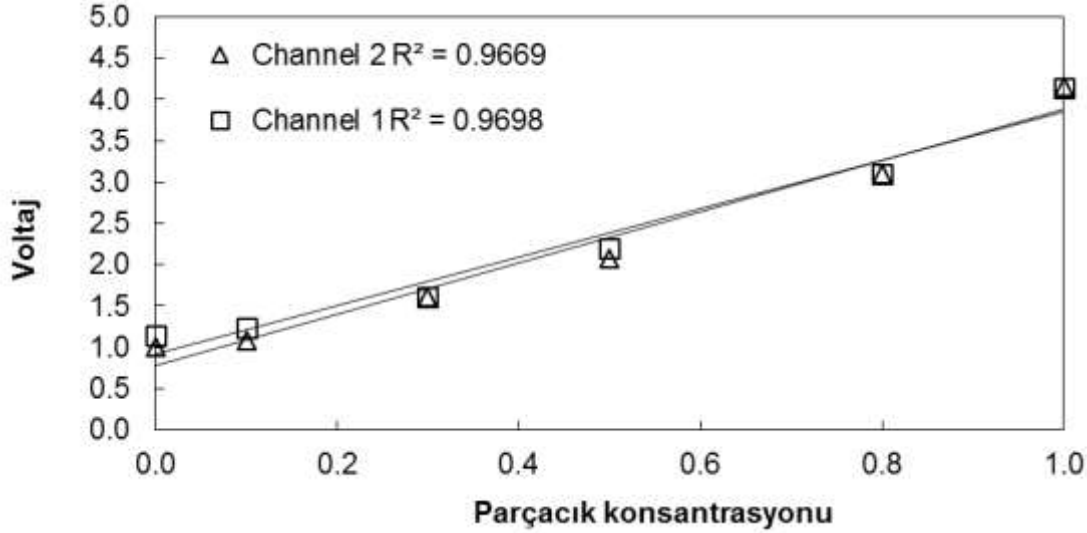
**Şekil 4.37.** Parçacık hızı analiz cihazının ön paneli (Fiber Optik Sonda El Kitabı)

İkinci aşamada ise %0-10-30-50-70-90-100'lük karışımlar için parçacıklar **Şekil 4.35**'teki sistem içerisinde yavaş yavaş akıtılarak voltaj değerleri alınmıştır. İlk aşama için öncelikle 2. bölümdeki üst küresel vana açılmış ve alt küresel vana kapatılmıştır. Sistem bu şekildeyken 1. bölgeden karışım sisteme doldurulmuş ve hemen ölçümler alınmıştır. Ölçümlerin hemen alınma sebebi parçacıklar arasında oluşan gevşek dolgulu yapının yakalanabilmesidir. İkinci aşamada ise yine ilk önce 2. bölümdeki üst vana açık, alt vana kapalı konumdayken karışım 1. bölgeden sisteme doldurulmuştur. Daha sonra alt vana açılarak ölçümler alınmaya başlanmıştır. 2. bölgedeki borunun çapının 1. bölgedekinden düşük olması sebebiyle akış örnekleme süresi aralığı içerisinde yer alacak şekilde gayet yavaş olmaktadır. Bütün kalibrasyon ölçümleri 10'ar kez tekrarlanmış ve ortalama değerler ile standart sapmaları kaydedilmiştir.

İki farklı fiber kanalında elde edilen ölçüm sonuçları **Şekil 4.38**'de gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde parçacık konsantrasyonu ile optik fiber sonda çıkışındaki voltaj değerleri arasında lineer bir ilişkinin var olduğu görülebilir. Bu lineer ilişki sayesinde, eğri üzerinde minimum ve maksimum noktaları belirlenerek doğrunun denklemi elde edilebilir.

Wang (2006)'ın çalışmasında ölçüm hacmi içerisinde ölçülen voltaj değeri ile parçacık konsantrasyonu arasında aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi lineer bir bağıntı olduğu bahsedilmektedir:

$$V = YV_o + (1 - Y)V_s \quad (4.1)$$



**Şekil 4.38.** Boyanmış parçacık karışımları kullanılarak elde edilen konsantrasyon-voltaj ilişkisi

Bu bağıntıda  $V_o$  ve  $V_s$ , parçacıkların gevşek dolgulu yapısında sırasıyla %100 ve %0'lık karışımlar için ölçülen ortalama voltaj değerleridir.  $Y$  ifadesi karışımdaki ağırlıkça orijinal parçacık konsantrasyonudur.  $V$  değeri ise karışımın ortalama voltaj değerine denk gelmektedir. Parçacık konsantrasyonu ile voltaj değeri arasında bir bağıntıya ulaşmak için aşağıdaki 4.2 nolu denklemden yararlanılmaktadır:

$$\varepsilon_p = Y\varepsilon_{p,0} \quad (4.2)$$

Burada  $\varepsilon_{p,0}$  parçacıkların gevşek dolgulu yapısı için hacimsel parçacık konsantrasyonudur. Bu değer zeolit parçacıkları için 0.4 olarak ölçülmüştür.  $\varepsilon_p$  ile  $V$  arasında lineer bir bağıntı olduğunu göstermek için 1 nolu denklemdeki her iki taraf  $V_o$  'a bölerek 4.3 nolu denklem elde edilmektedir. Kalibrasyon ölçümleri ile elde edilen karışımlara karşılık gelen voltaj değerleri denklemde yerine konulur ise iki fiber kanalı için 4.3 nolu denklemdeki lineer ilişki elde edilmektedir.

$$\varepsilon_P = \varepsilon_{P,0} \frac{V - V_S}{V_o - V_S} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki 4.3 nolu denklem içerisinde yer alan  $V_o$  ve  $V_S$  değerleri her parçacık konsantrasyonu ölçümünden önce **Şekil 4.35**'de yer alan düzenek kullanılarak ölçülmektedir.

#### 4.4.3 Parçacık Konsantrasyonu Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada, lokal parçacık konsantrasyonu ölçümleri, Bölüm 4.4.1'de detayları anlatılan fiber optik ölçüm sistemi kullanılarak 30 derecelik yarım taşkın-akışkan yatakta gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler için gazın aşağıdan girdiği noktadan 11 cm yükseklikte, yatağın ön paneline ve arka bölmesine optik sondanın girişini sağlamak için delikler delinmiştir. Sistem çalışmadan optik sondanın sisteme yerleştirilmiş halinin fotoğrafı **Şekil 4.39** ve **Şekil 4.40**'da verilmektedir. Ölçüm sırasında, optik sondanın pleksiglas taşkın-akışkan yatağa dışarıdan girecek olan ışıktan etkilenmemesi için, sistem siyah plastik ve bezlerle iyice sarılmıştır.



**Şekil 4.39.** Optik sondanın yarım taşkın-akışkan yatakta taşkın bölgesine yerleştirilmiş fotoğrafı



**Şekil 4.40.** Optik sondanın yarım taşkın-akışkan yatakta halka bölgesine yerleştirilmiş fotoğrafı

Parçacık konsantrasyon ölçümleri, **Çizelge 4.16'**da verilen deney koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu deney koşulları altında, taşkınlaşma ve akışkanlaşma gaz hızlarının radyal parçacık konsantrasyon profiline olan etkisi incelenmiştir. İzlenilen deney matrisi **Çizelge 4.17'**de verilmektedir. Bu deneyler Bölüm 4.3'de anlatılan basınç düşümü ve minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızının belirlendiği hidrodinamik çalışmada sağlanan operasyon koşullarına göre belirlenmiştir. Deneylerde, akışkanlaşma gaz hızları hidrodinamik çalışmadakilerle aynı tutulmuştur. Taşkınlaşma gaz hızı ise, hidrodinamik çalışmada belirlenen minimum kararlı taşkınlaşma hızına ( $U_{mss} = 9.2 \text{ m/s}$ ) eşit alınmıştır. 1-3 ve 11-18 numaralı deneylerde ise, minimum kararlı taşkınlaşma hızından daha yüksek hızlar kullanıldığında yatak içi parçacık konsantrasyonunun nasıl değiştiği incelenmiştir.

Optik sonda ölçümleri sırasında ölçme frekansı 10 kHz ve örnekleme süresi 20 saniye olarak ayarlanmıştır. Parçacık konsantrasyonunun 4.3 nolu denklem kullanılarak hesaplanabilmesi için, akış borusu ve halka bölgesi ölçümlerinden önce üçer kere  $V_o$  ve  $V_s$  değerleri **Şekil 4.35'**de yer alan düzenek zeolit kullanılarak ölçülmüştür. Sistem içindeki her radyal noktada 3 ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin ortalama değerleri bu raporda verilmektedir.

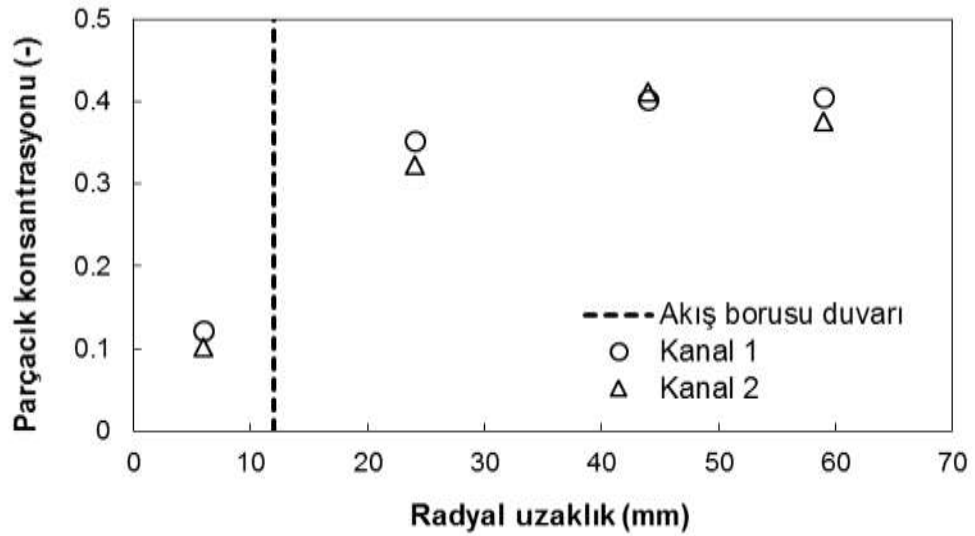
**Çizelge 4.16.** Deney koşulları

Parametreler	Değerler
Konik Açısı	30°
Akış Borusu Yüksekliği	130 mm
Akış Borusu İç Çapı	23 mm
Akış Borusunun Yatak Girişinden Yüksekliği	30 mm
Statik Yatak Yüksekliği	130 mm
Taşkın Hava Giriş Çapı	10 mm
Malzeme Ağırlığı	160 gr

**Çizelge 4.17.** Deney matrisi

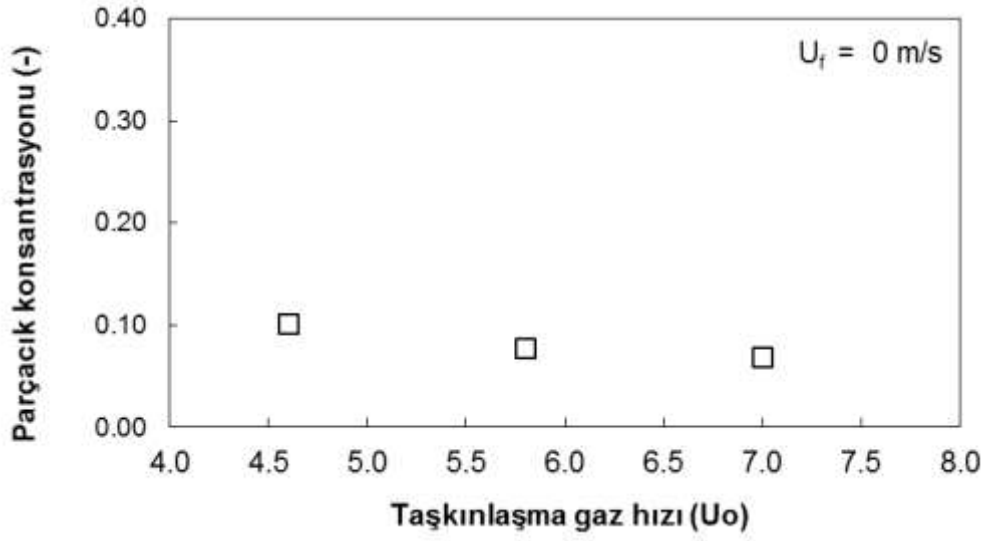
Deney setleri	Taşkınlaşma gaz hızı, $U_o$ (m/s)	Akışkanlaşma gazı hızı, $U_f$ (m/s)	Ön panelden olan radyal uzaklık (mm)
1	9.2	0	6 (Akış borusu ortası)
2	11.6	0	6 (Akış borusu ortası)
3	14	0	6 (Akış borusu ortası)
4	9.2	3.58	6 (Akış borusu ortası)
5	9.2	4.92	6 (Akış borusu ortası)
6	9.2	6.24	6 (Akış borusu ortası)
7	9.2	0	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
8	9.2	3.58	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
9	9.2	4.92	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
10	9.2	6.24	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
11	11.6	0	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
12	11.6	3.58	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
13	11.6	4.92	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
14	11.6	6.24	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
15	14	0	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
16	14	3.58	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
17	14	4.92	24, 44, 59 (Halka bölgesi)
18	14	6.24	24, 44, 59 (Halka bölgesi)

**Şekil 4.41**'de parçacık konsantrasyonunun radyal değişimi gösterilmektedir. Bölüm 4.4.1'de anlatıldığı gibi, bu çalışmada kullanılan optik sonda, 2 fiber demeti içermektedir. Her demetin içinde de ışık yayan ve ışık alıcı fiberler birbirine yapışık ve sıra sıra dizilmişlerdir. Sondadan sisteme gönderilen ışık parçacıklara çarptıktan sonra sisteme geri yansımakta ve ışık alıcı fiberler tarafından alınıp her iki fiber demeti için ayrı fotomultiplikatöre yollanmakta ve 2 ayrı kanal verisi olarak kaydedilmektedir. İki kolon halinde kaydedilen bu veriler, kalibrasyon denkleminin kullanıldığı MATLAB® programı yardımıyla işlenip, parçacık konsantrasyonu hesaplanmaktadır. **Şekil 4.41**'de görülebileceği gibi, her iki kanal vasıtasıyla elde edilen parçacık konsantrasyonu birbirine çok yakındır. Dolayısıyla, bu raporda kanallardan biri tarafından elde edilen data verilecektir. Birbiri üzerinde herhangi bir üstünlüğü olmamakla beraber, rapor içinde Kanal 2 verisinin kullanılmasına karar verilmiştir.



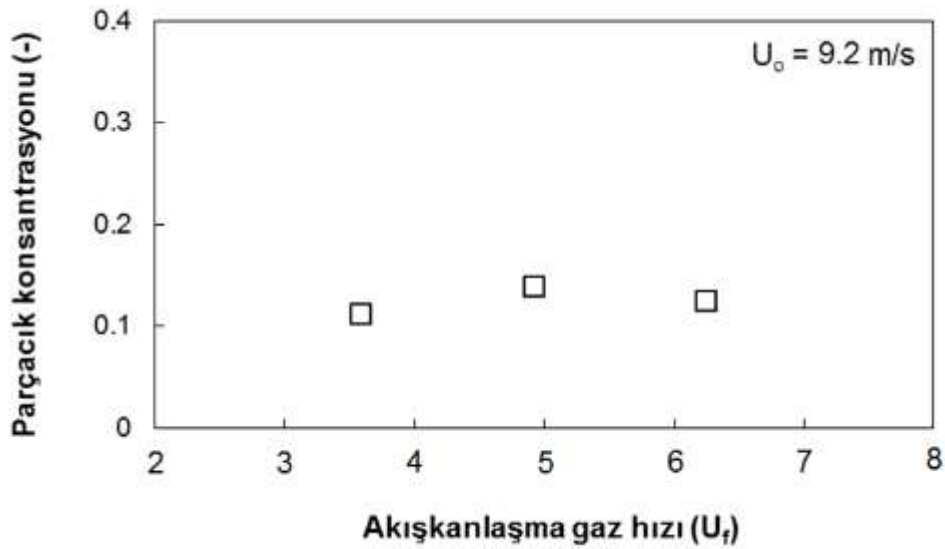
**Şekil 4.41.** Parçacık konsantrasyonunun radyal değişimi (Deney seti 1:  $U_o = 9.2$  m/s ve  $U_f = 0$ )

**Şekil 4.42**'de taşkınlaşma gaz hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna olan etkisi gösterilmektedir. Bu ölçümler, akış borusu içinde, yani sistemin ön-düz yüzeyinden 6 mm içeride gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sırasında, yatak sadece taşın yatak olarak yani akışkanlaşma gazı verilmeden ( $U_f = 0$ ) çalıştırılmıştır. Akış borusu içinde genel olarak parçacık konsantrasyonunun düşük olduğu görülmektedir. Bu şekil incelendiğinde, akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonunun taşkınlaşma gaz hızı ile belirgin bir biçimde değişmediği görülmektedir.



**Şekil 4.42.** Taşkınlaşma gaz hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna olan etkisi (Deney seti 1-3:  $U_r = 0$ )

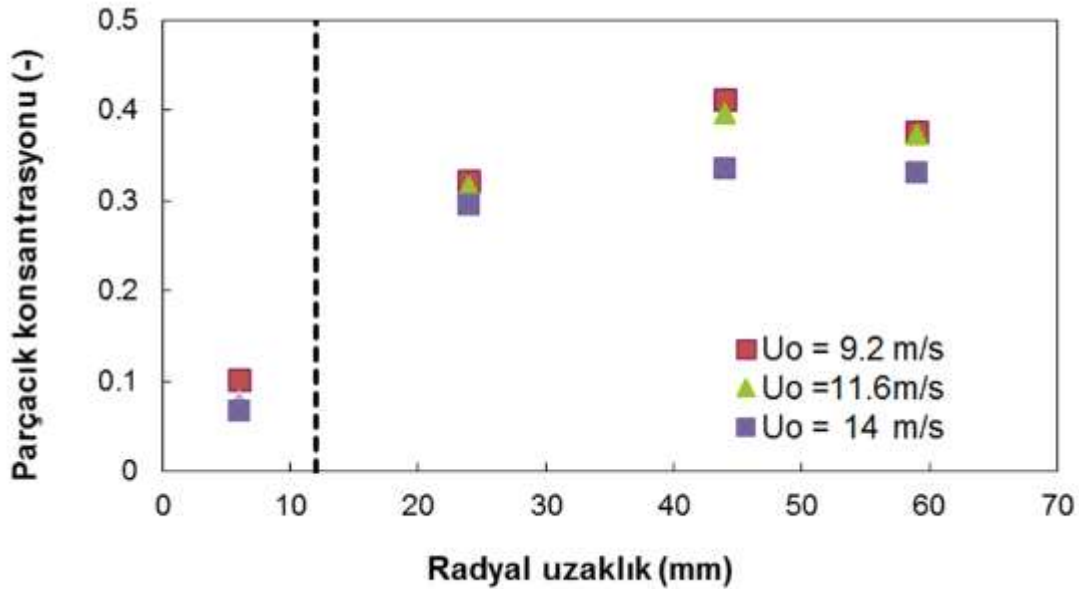
**Şekil 4.43'**de akışkanlaştırıcı gaz hızının akış borusundaki parçacık konsantrasyonuna olan etkisi gösterilmektedir. Akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonunun akışkanlaşma gaz hızı ile belirgin bir biçimde değişmediği görülmektedir. Özet olarak, akış borusu içinde parçacık konsantrasyonu operasyon koşullarından belirgin bir biçimde etkilenmemektedir.



**Şekil 4.43.** Taşkınlaşma gaz hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna olan etkisi (Deney seti 1-3:  $U_r = 0$ )



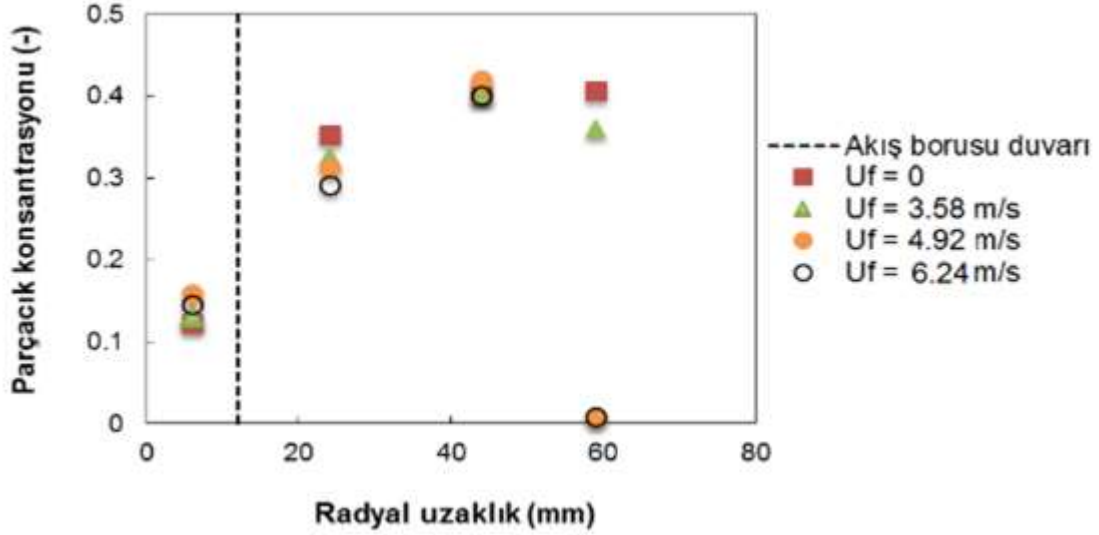
**Şekil 4.44'**de taşkınlaşma hızı ile parçacık konsantrasyonunun tüm yatak içerisindeki radyal değişimi verilmektedir. Parçacık konsantrasyonu genel olarak incelendiğinde, taşkın bölgedeki parçacık konsantrasyonunun halka bölgesindekinden çok düşük olduğu görülmektedir. Akış borusunun sağ tarafında yani halka bölgesinde, parçacık konsantrasyonu aniden yükselmektedir. Halka bölgesinde parçacıklar birbirlerine daha yakın oldukları için arka duvara yakın konumlarındaki parçacık konsantrasyonu değeri gevşek yapıdaki dolgulu yatakta görülecek parçacık konsantrasyonu değerine yakındır. Bu da, bu bölgede daha hareketsiz bir yapının olduğunu göstermektedir. Taşkınlaşma hızı 14 m/s değerine kadar artırıldığında, parçacık konsantrasyonunun halka bölgesinde azaldığı ve daha homojen bir radyal dağılımın olduğu gözlemlenmektedir.



**Şekil 4.44.** Taşkınlaşma hızının parçacık konsantrasyonunun radyal değişimine olan etkisi (Deney seti 7,11,15:  $U_f = 0$ )

**Şekil 4.45'**de akışkanlaşma hızı ile parçacık konsantrasyonunun tüm yatak içerisindeki radyal değişimi verilmektedir. Akışkanlaşma hızı arttıkça akışkan borusu içinde belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Ancak, halka bölgesinde, parçacık konsantrasyonunu düşmektedir. Özellikle duvara en yakın bölgede ( $r = 59$  mm), yüksek akışkanlaşma hızlarında parçacık konsantrasyonunun sıfıra yakın bir değere yaklaştığı yani o bölgede yeterli parçacık olmadığı görülmektedir. Etketif bir operasyon sırasında, halka bölgesinde parçacık konsantrasyonunun yüksek olmasından dolayı görülen ölü bölgelerin giderilebilmesi için yatak yanlarından akışkan gazı verilse de bu gazın parçacıkların çok az olduğu boş bölgelerin oluşması da istenmez.

Homojen bir karışım için, değişik radyal konumlarındaki parçacık konsantrasyonun olabildiğince aynı olması hedeflenmelidir. **Şekil 4.45** incelendiğinde, akışkanlaşma hızının 4.92 m/s'den küçük olması gerektiği görülmektedir. Bu değer 3.4 m/s ile 4.92 m/s arasında olması tercih edilmelidir.



**Şekil 4.45.** Akışkanlaşma hızının parçacık konsantrasyonunun radyal değişimine olan etkisi (Deney seti 1, 4-6, 7-10:  $U_0 = 9.2$  m/s)

Sonuç olarak;

- Akışkanlaşma ve taşkınlaşma hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna ciddi bir etkisinin olmadığı görülmektedir.
- Halka bölgesinde ise, akışkanlaşma ve taşkınlaşma hızının artmasıyla parçacık konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Akışkanlaşma gazının verilmesiyle duvar kenarlarında oluşan ölü bölgelerin ortadan kalktığı ve daha homojen bir radyal parçacık dağılımının oluştuğu görülmektedir.
- Akışkanlaşma hızının çok yüksek olduğu durumlarda ise, duvar kenarında parçacıkların çok az olduğu hava boşluğu bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Kurutma esnasında yatakta gaz-katının iyi bir şekilde sağlanması çok önemlidir. Bu tip hava boşlukları veya ölü bölgeler bu temasın efektif olmamasına sebep olmaktadır. Parçacık konsantrasyon ölçümleri ışığında akışkanlaşma hızının 4 m/s civarında tutulması gerektiğini göstermektedir.

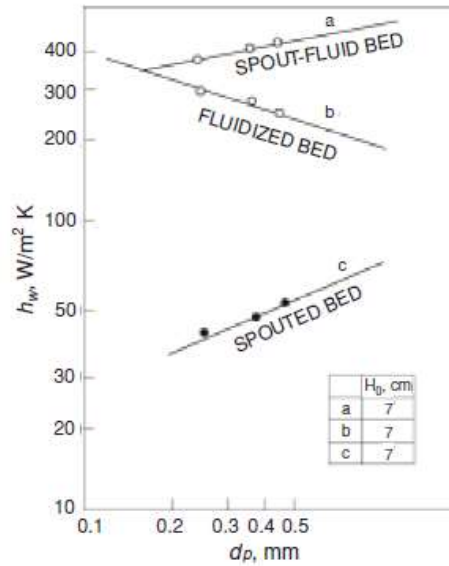
## 4.5 Isı Transferi Ölçümleri

### 4.5.1. Yarım (Kesit) Taşkın-akışkan Yatakta Isı Transferi Çalışmaları

#### 4.5.1.1 Giriş

Akışkan, taşkın ve taşkın-akışkan yataklarda ısı transferi transferi çalışmaları iki farklı alanda yoğunlaşmıştır: parçacıklar ve gaz arasındaki ısı transferi (*gaz-katı ısı transferi*) ve yatakla (gaz ve parçacıklar) yatağın içine daldırılmış bir yüzey arasındaki ısı transferi (*yatak-yüzey ısı transferi*). Gaz-katı ısı transferi çalışmaları yatak malzemesiyle gaz arasındaki ısı alışverişini incelemeyi amaçlarken, yatak-yüzey ısı transferi çalışmaları yatağın içinden ısı çeken (soğutma boruları vb.) yüzeylerle yatak arasındaki ısı alışverişini hesaplamayı hedeflemektedir.

Bir gaz-katı kontak reaktöründe yatak-yüzey ısı transferi gaz-katı akış dinamiğine (hidrodinamik), parçacıkların ısı özelliklerine (ısı iletim katsayısı, ısı kapasite), boyutuna ve yoğunluğuna bağlıdır. **Şekil 4.46**'da farklı reaktör tipleri için elde edilmiş yatak-yüzey ısı transferi değerleri gösterilmektedir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'den görülebileceği gibi taşkın-akışkan yataklarda parçacık boyutundan bağımsız olarak akışkan ve taşkın yataklara göre daha yüksek ısı transferi katsayıları elde edilmiştir.



**Şekil 4.46.** Farklı yatak tipleri için parçacık boyutu ( $d_p$ ) ile değişen yatak-yüzey ısı transferi katsayıları (Chatterjee vd.,1983).

Yatak-yüzey ısı transferi konusunda klasik akışkan yataklarda ciddi bir literatür bulunmasına karşın, taşkın-akışkan yataklardaki çalışmalar (taşkın-akışkan yatakların göreceli olarak daha yeni bir reaktör türü olmasından dolayı) sınırlıdır. Aşağıda verilen **Çizelge 4.18**'de şimdiye

kadar yapılmış çalışmaların bir özeti sunulmuştur. Şu ana kadar taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilmiş bir adet yatak-yüzey ısı transferi çalışması bulunmaktadır ve bu çalışmada da akış borusu kullanılmamıştır.

**Çizelge 4.18.** Taşkın ve taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilmiş yatak-yüzey ısı transferi çalışmaları.

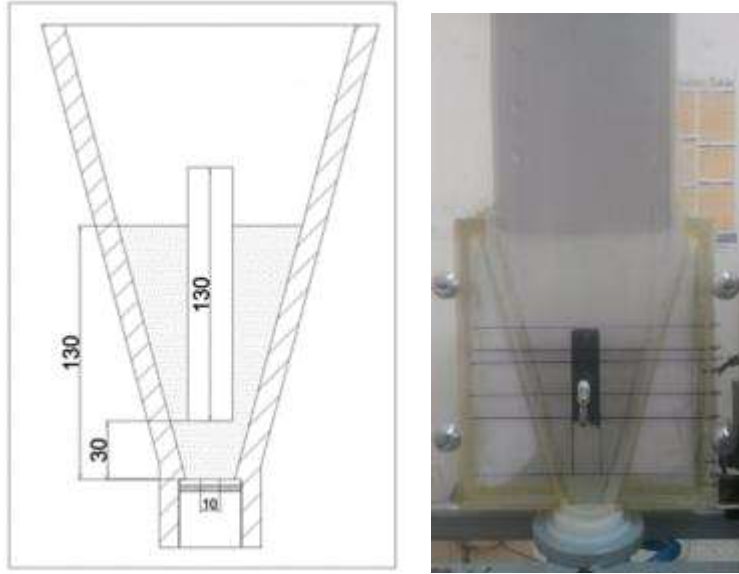
Yatak Tipi	Yazarlar	Parçacık ve Çapı	Isı Transferi Katsayısı, W/m <sup>2</sup> K
Konik Taşkın Yatak (30°)	Zabrodsky ve Mikhalik (1967)	Silika jel (2.4 mm)	190-260
Dikdörtgen Taşkın-akışkan Yatak	Chatterjee vd. (1983)	Cam boncuk (0.254,0.388,0.461 mm)	200-450
Taşkın Yatak (60°)	Macchi vd. (1999)	- Nylon (2.90 mm) - Polietilen (2.89,3.07,3.22 mm) - Cam (3, 1.6 mm) - Alüminyum (3.75, 1.98 mm)	95-230
Akış Borulu Taşkın Yatak (60°)	Freitas ve Freire (2000)	Cam boncuk (2.6 mm)	≤ 100
Akış Borulu Taşkın Yatak (32°)	Makibar vd. (2011)	Silika kum (1.05 mm)	170 ve 220
Akış Borulu Taşkın Yatak (90°)	Nagaraju ve Sridhar (2014)	Yer fıstığı (12.01 mm)	132
Konik Taşkın Yatak (28°)	Saldarriaga vd. (2015)	- Kum (0.17 mm) - Talaş (0.76 mm)	100-505 25-300

Proje kapsamında gerçekleştirilen yatak-yüzey ısı transferi çalışmalarının amacı akış borulu taşkın-akışkan yataklarda yatak-yüzey ısı transferi katsayılarının zeolit parçacıkları için deneysel olarak belirlenmesidir. Deneyler zeolit parçacıklarının tipik kurutma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Özellikle taşkın hava debisinin yatak-yüzey ısı transferi katsayısı üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

#### 4.5.1.2. Deney Düzeneği ve Çalışma Koşulları

Tüm deneyler 30 dereceli akış borulu yarım (kesit) taşkın-akışkan yatakta gerçekleştirilmiştir. Kullanılan 30 derecelik yarım taşkın-akışkan yatağın geometrik ölçüleri **Şekil 4.47** ve **Çizelge 4.19**'de sunulmuştur. Bölüm 4.3'de belirtildiği gibi 30 derecelik yatağın kurutmadaki ve parçacık hidrodinamiğindeki performansı göz önüne alınarak, taşkın-akışkan yatakta ısı transferi çalışmaları buna paralel olarak yapılmış, kurutma deneylerinin yapıldığı koşullar yarım yatağın görsel avantajı kullanılarak ısı transferi deneyleri için kullanılmıştır.

Dolayısıyla yatak malzemesi 160 gr olarak seçilmiş (statik yatak yüksekliği = 13 cm) ve deneyler **Çizelge 4.20**'de sunulan taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava hızlarında yapılmıştır<sup>2</sup>. Taşkınlaşma hızı kolon alanı<sup>3</sup> referans alınarak yeniden hesaplandığında elde edilen değerler de **Çizelge 4.20**'de sunulmuştur.



**Şekil 4.47.** Isı transferi deneylerinde kullanılan 30 derecelik yarım taşkın-akışkan yatağın geometrik ölçüleri

**Çizelge 4.19.** Deney koşulları ( $\gamma = 30^\circ$ )

Parametreler	Değerler
Konik Açısı, $\gamma$	$30^\circ$
Akış Borusu Yüksekliği	130 mm
Akış Borusu İç Çapı	23 mm
Akış Borusu Yatak Girişinin Yüksekliği	30 mm
Statik Yatak Yüksekliği	130 mm
Taşkın Hava Giriş Çapı	10 mm
Yatak Malzemesi Ağırlığı	160 gr
Yatak uzunluğu	1170 mm
Yatak genişliği	150 mm

<sup>2</sup> Raporun önceki kısımlarında belirtildiği gibi, akışkanlaşma ve taşkınlaşma hızları için hava giriş alanı referans alınmıştır.

<sup>3</sup> 15 cm kolon çapına karşılık gelen alan.

**Çizelge 4.20.** Isı transferi deneylerinde kullanılan taşkınlaşma,  $U_s$  ve akışkanlaşma,  $U_f$  hava hızları.

$U_f$ (m/s)	$U_s$ (m/s)	$U_{f,kolon\ alanı}$ (cm/s)
0	9.2	0
3.58	7.2	1.59
4.92	6.8	2.19
6.24	6.6	2.77

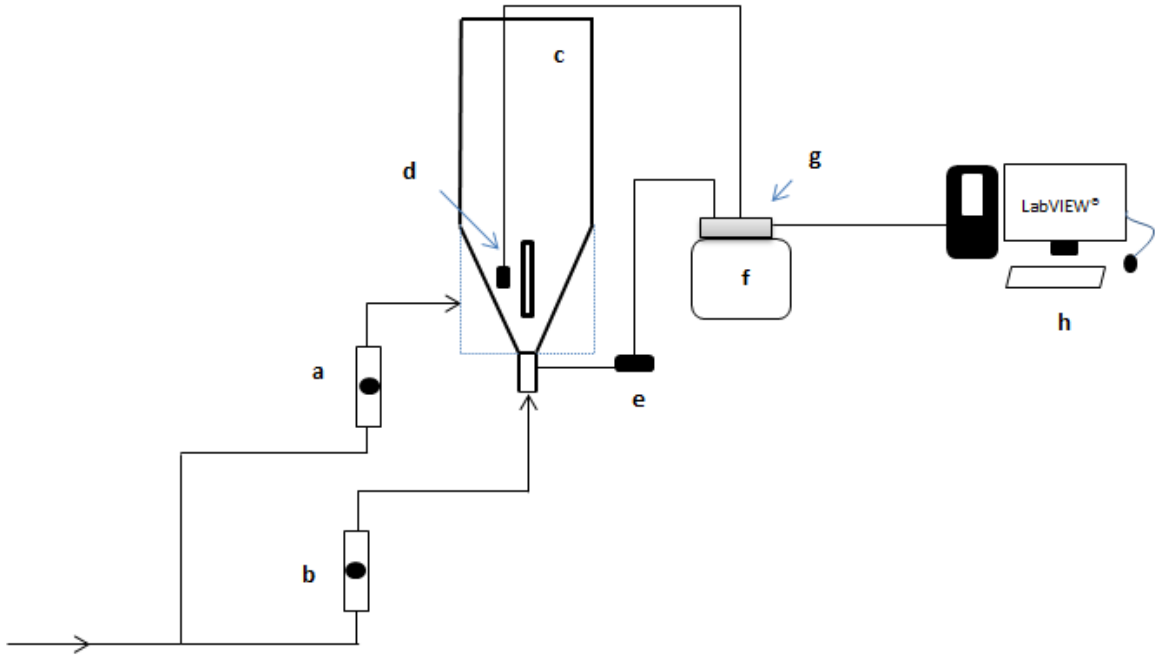
Zeolit parçacıkları için minimum akışkanlaşma hızları ( $U_{mf}$ ) hızları farklı korelasyonlar kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler **Çizelge 4.21**'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak zeolit parçacıklarının minimum akışkanlaşma hızı 3.4 cm/s olarak kabul edilebilir. **Çizelge 4.20**'deki kolon alanına göre hesaplanan taşkınlaşma hızları, minimum akışkanlaşma hızının altında kalmaktadır. Dolayısıyla halka bölgesinin dolgu yatak rejiminde çalıştığı öngörülebilir.

**Çizelge 4.21.** Zeolit parçacıkları için elde edilen minimum akışkanlaşma hızı değerleri.

Kullanılan Korelasyonlar	Minimum akışkanlaşma hızı ( $U_{mf}$ ), cm/s
Wen ve Yu (1966)	2.6
Richardson vd. (1979)	3.0
Saxena ve Vogel (1977)	4.8

Deney sırasında kullanılan hava Yiğitsan marka (Model YVK 25) 18.5 kW'lık bir vidalı kompresörden laboratuvara gelmektedir. Kompresör maksimum 8 bar basınca ulaşabilmekte ve 3100 lt/dak (standart hava şartlarında) hava debisi sağlayabilmektedir. Gelen hava ilk olarak ikiye ayrılmaktadır. Taşkınlaşma havası için DWYER marka RMC-103-BV kodlu 94 lt/dk kapasiteli bir rotametre, akışkanlaşma havası içinse OMEGA marka FT044-16-CA-VN kodlu 60 lt/dk kapasiteli ayrı bir rotametre yatağa bağlanmıştır. Basınç ölçümleri Omega marka PX163-120D5V kodlu (-20 +120 cm H<sub>2</sub>O basınç kapasiteli) sensör ile deney koşullarının uyumluluğunu kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Deneyin amacına uygun şekilde yatak-yüzey ısı transferi katsayısını belirlemek amacıyla 0.4 mm kalınlığında iki bakır metal yüzey arasına yerleştirilmiş OMEGA marka KH-KIT-EFH-15001 kodlu Kapton esnek ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtıcı -200'den +200 °C arasında çalışma sıcaklığına sahip olup 0.203 mm kalınlığa sahiptir. Oluşturulan bakır metal levhanın her iki tarafına sıcaklık ölçmek için OMEGA marka J-tipi ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Isıtıcıyı beslemek ve basınç sensörünü çalıştırmak için

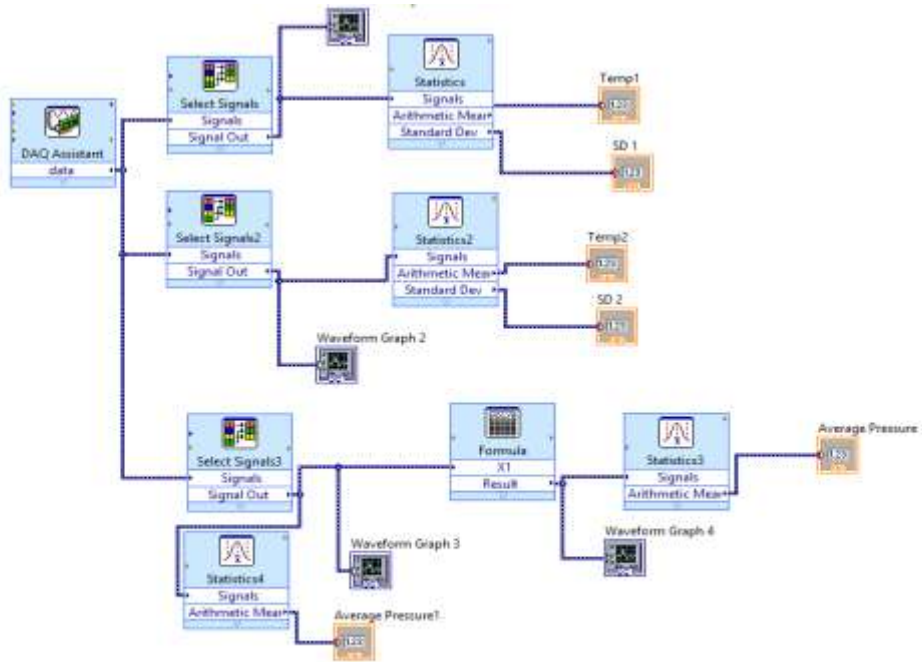
GWINSTEK marka güç kaynağından yararlanılmaktadır. Toplanan basınç ve sıcaklık verileri ise analog-digital sinyal çevrimi yapan National Instruments firmasının NI PCI-6820 modeli veri toplama kartı ve LabVIEW yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Sıcaklık verileri yatak sürekli duruma ulaştıktan sonra 1000 Hz veri toplama hızında, toplam 10 saniye süresince alınmıştır. Ölçümlerin ortalama değerleri kullanılmıştır. **Şekil 4.48**'de ölçüm sistemi ve deney düzeneği gösterilmiştir. **Şekil 4.49**'da ise deney düzeneğinin fotoğrafı sunulmaktadır. Isı transferi çalışmalarında kullanılan LABVIEW kodu ise görsel formatta **Şekil 4.50**'de verilmiştir.



**Şekil 4.48.** Deney düzeneği ve ölçüm sistemi (**a.** OMEGA Rotametre (FT044-16-CA-VN) 0-60 lt/dk, **b.** DWYER Rotametre (RMC-103-BV) 20-200 SCFH, **c.** Yarım taşkın-akışkan yatak, **d.** Isı Transferi Sondası, **e.** Basınç Sensörü, **f.** Güç Kaynağı, **g.** Veri toplama cihazı (NI PCI-6820), **h.** Bilgisayar).



**Şekil 4.49.** Deney düzeneğinin fotoğrafı

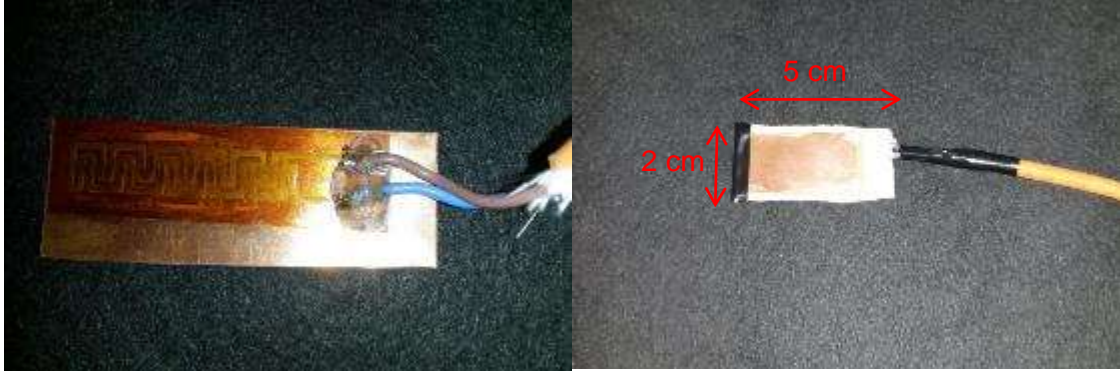


**Şekil 4.50.** Isı transferi deneyleri için kullanılan LabVIEW programı



#### 4.5.1.3 Yatak-yüzey Isı Transferi Ölçümü ve Teorisi

Isı transferinde kullanılan sonda için ısı iletkenliğinin önemi düşünülerek bakır kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece  $8.8 \Omega$  direncinde esnek ve kendinden yapışkanlı Kapton ısıtıcı 5x2 cm'lik bakır plakanın üstüne yapıştırılmıştır. Başka bir bakır metal kullanılarak tost edildikten sonra kenarlarından yüksek ısıya dayanıklı silikon yapıştırıcı sürülerek tek parça haline gelmesi sağlanmıştır (**Şekil 4.51**).



**Şekil 4.51.** Isı transferi sondasının yapım aşamasında ve sonrasındaki fotoğrafları

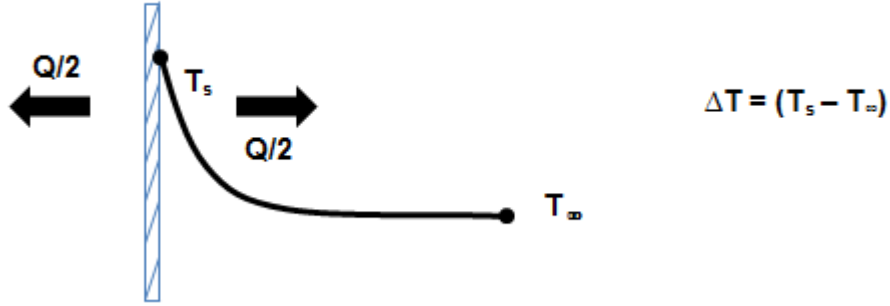
Farklı voltaj ve amper değerlerinde ısıtıcının yatak içerisinde ve dışarısında ulaştığı sıcaklıklar kontrol edilerek, öncelikli olarak  $200^{\circ}\text{C}$ 'nin altında güvenli olacak şekilde bir sınır voltaj ve amper değeri tespiti yapılmıştır. Bunun sonucunda 1 amper değerinin geçilmemesine karar verilmiştir. Böylece sondaya zarar verebilecek bir akımdan korunulması amaçlanmıştır. Tüm deneylerde 7.5 volt ile 0.8 amper kullanılarak, sondaya 6 W'lık bir güç sağlanmıştır. Bu güç sonda yüzeyindeki ısı transferi hızına eşit olarak kabul edilmiştir.

Isı transferi sondasının her iki yüzeyine sıcaklık ölçümleri için termočiftler yerleştirilmiştir. Resistans tarafından üretilen ısının eşit şekilde yüzeyin her iki tarafından yatağa transfer edildiği varsayılmıştır (**Şekil 4.52**). Dolayısıyla sondanın her iki yüzeyi için konvektik ısı transferi katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$h = \frac{\dot{Q} / 2}{A(T_s - T_{\infty})} \quad (4.1)$$

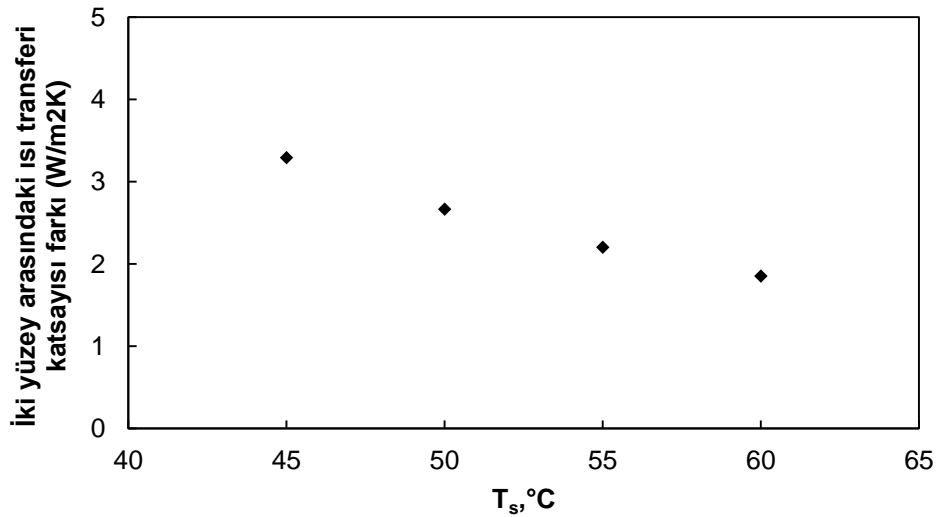
Yukarıdaki denklemde A sondanın yüzey alanını,  $T_s$  ve  $T_{\infty}$  ise yüzey ve yatak sıcaklığını temsil etmektedir. Sondaya sağlanan güç miktarı oldukça küçük olduğu için yatak sıcaklığı değişmemektedir. Dolayısıyla yatak sıcaklığı ortam hava sıcaklığına eşit alınmıştır. Bu

denklemlerle hesaplanan konvektif ısı transferi katsayısı hava ve parçacıklar tarafından sonda yüzeyinden transfer edilen ısıyı temsil etmektedir. Bu noktada ısı transferi katsayısını hem gaz (hava) hem de parçacık özellikleri etkilemektedir. Parçacık çapı, yoğunluğu, ısı kapasitesi, sonda etrafındaki parçacık konsantrasyonu ve parçacık-yüzey kontak frekansı ısı transferi katsayısını etkileyen faktörlerdendir.



**Şekil 4.52.** Yatak-yüzey ısı transferi katsayısının hesaplanmasında kullanılan yaklaşım.

Bakır metallerin ortasında bulunan ısıtıcının her iki tarafa eşit bir şekilde ısı dağıtması istenmektedir. Bu nedenle yatak dışında yapılan ölçümler yapılarak (serbest konveksiyon koşullarında) sondanın her iki yüzeyinden sıcaklık ölçümleri alınmış ve bu sıcaklıklar karşılaştırılmıştır. Yüzey sıcaklıkları arasında 0.5 °C'den az bir fark olduğu tespit edilmiştir. Bu sapma nedeniyle ısı transferi katsayısındaki farklar **Şekil 4.53**'de sunulmuştur. Bu şekilden görülebileceği üzere iki yüzey arasındaki ısı transferi katsayısı farkı 3.5 W/m<sup>2</sup>K değerinin altındadır.



**Şekil 4.53.** ısı transferi katsayısında,  $h$ , artan sıcaklık ile maksimum sapmalar.

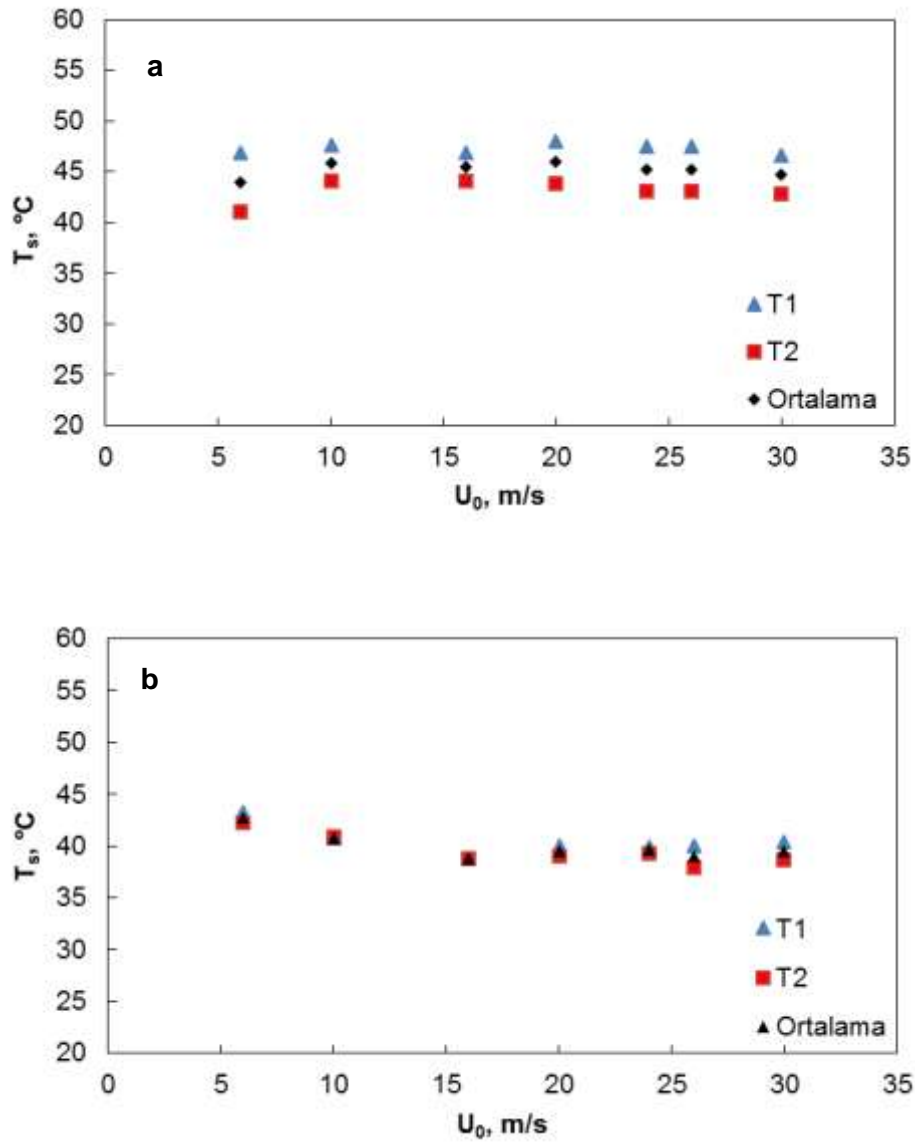
#### 4.5.1.4 Isı Transferi Katsayısının Halka ve Taşkın Bölgelerinde Belirlenmesi

Yapılan deneylerde öncelikli olarak halka bölgesinde akışkanlaşma ve taşkınlaşma havasının ısı transferi katsayısına etkisi incelenmiştir. Ayrıca taşkın bölgede artan hava hızının ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Halka bölgesi ölçümlerinde sondanın yatak içerisindeki pozisyonu **Şekil 4.54**'de gösterilmiştir.  $T_1$  ve  $T_2$  olarak verilen değerler sondanın sağında ve solunda bulunan ısı çiftleri ifade etmektedir.  $T_2$  her zaman taşkın bölgeye bakarken,  $T_1$  duvar tarafına bakmaktadır. Buna istinaden sonuçlar  $T_1$  ve  $T_2$  için ayrı ayrı ve ortalamaları alınarak sunulmuştur.



**Şekil 4.54.** Halka bölgesi ölçümleri için ısı transferi sondasının yatak içi pozisyonu

Deneyler sırasında taşkın ve halka bölgelerinde sıcaklıklar genel olarak 40 ile 50°C arasında değişmiştir. **Şekil 4.55**'de taşkın ve halka bölgelerinde farklı taşkınlaşma hızlarında elde edilen yüzey sıcaklıkları sunulmuştur. Halka bölgesinde genel olarak artan taşkınlaşma havası ile sıcaklığın hafif azalıp devamında sabit kaldığı görülürken, taşkın bölgede hafif artan ve sonrasında sabit kalan bir trend görülmektedir.



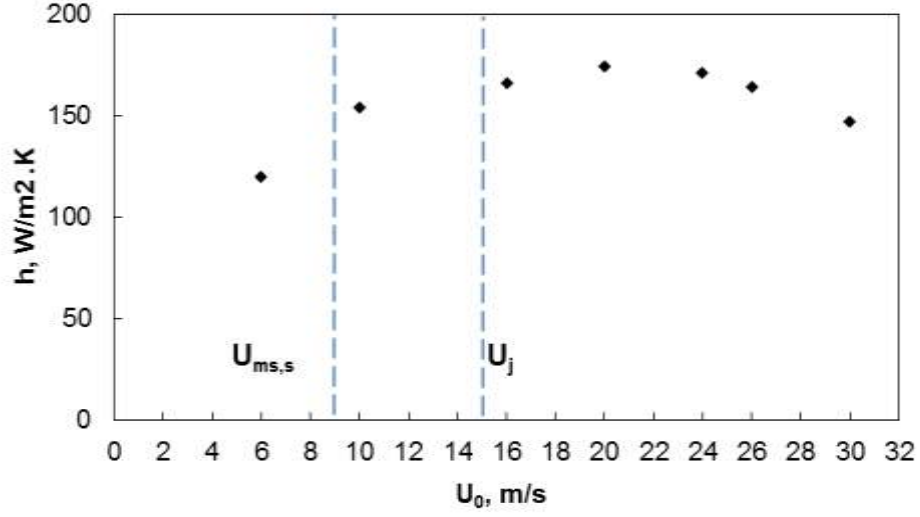
**Şekil 4.55.** Artan taşkın hava hızı ( $U_0$ ) ile  $T_s$  değişimleri a) taşkın bölgesinde ( $U_f=0$  m/s) b) halka bölgesinde ( $U_f=10.6$  m/s).

**Şekil 4.56 - 4.60** 'da halka bölgesinde sırasıyla artan akışkanlaşma ( $U_f$ ) değerlerinde (0, 3.58, 4.92, 6.24, 10.6 m/s) ısı transferi katsayısının taşkınlaşma hızı,  $U_0$ , ile değişimi gösterilmektedir<sup>4</sup>. Ayrıca her şekilde noktalı çizgilerle minimum kararlı taşkınlaşma ( $U_{ms,s}$ ) ve jet ( $U_j$ ) hızları belirtilmiştir.

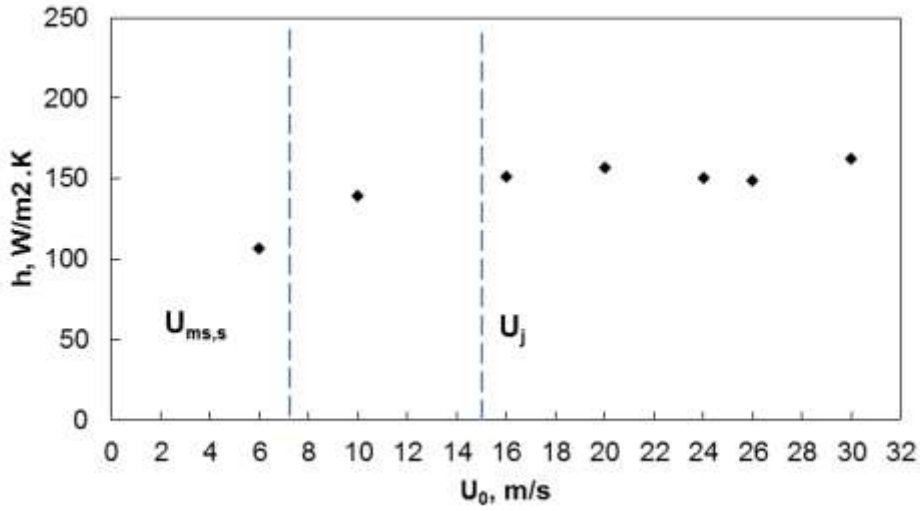
Genel olarak göreceli olarak düşük olan ısı transferi katsayısı minimum taşkınlaşma hızının geçilmesiyle birlikte hızla artmakta jet bölgesi içerisinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Isı transferi katsayısı akışkanlaşma havası verilmediği takdirde ( $U_f=0$  m/s) 20 m/s civarlarında

<sup>4</sup> Hidrodinamik İçalışmalarda kullanılmayan 10.6 m/s taşkınlaşma hızı da test edilmiştir.

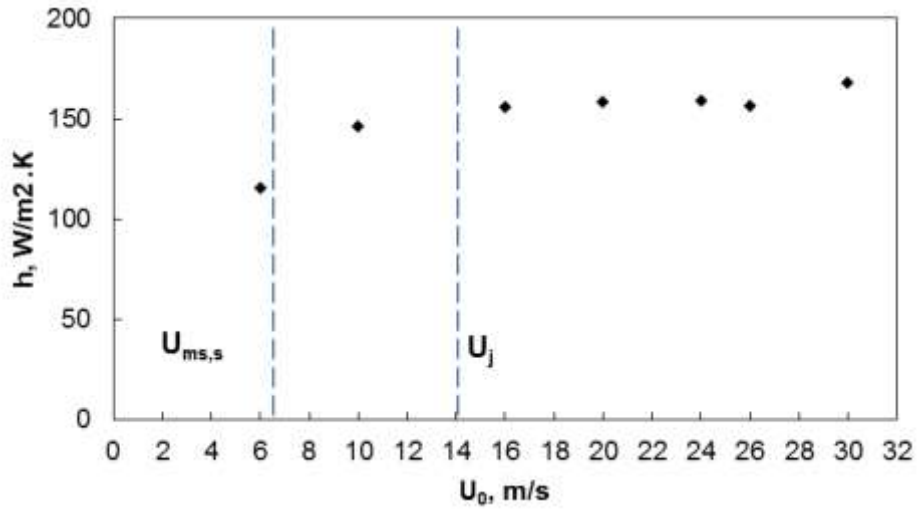
maksimum değere ulaşır (yaklaşık  $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), azalmaktadır. Akışkanlaşma havası kullanıldığında durumlarda ise ısı transferi katsayısı yüksek taşkınlaşma hızlarında hafif bir artış göstermekte ve  $3.58 \text{ m/s}$ ,  $4.92 \text{ m/s}$  ve  $6.24 \text{ m/s}$  hızlarında maksimum değerine en yüksek taşkınlaşma hızında ulaşmaktadır.



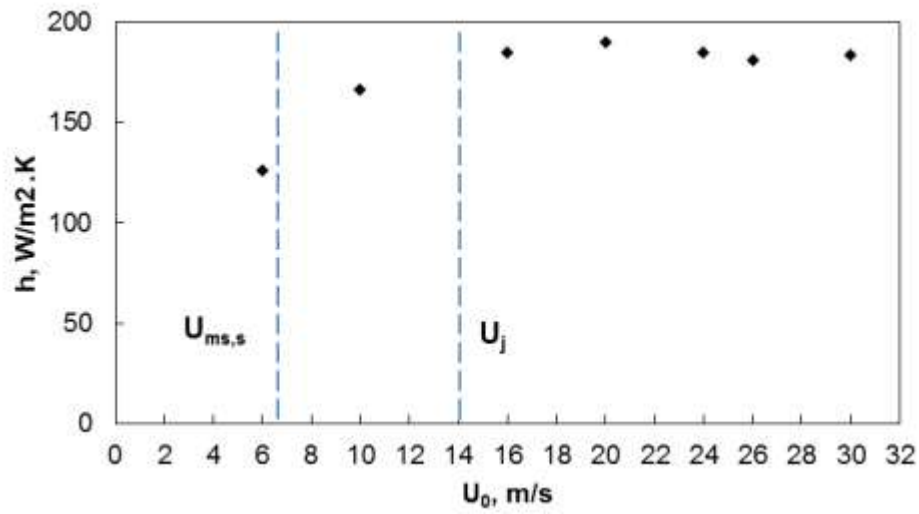
**Şekil 4.56.** Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_f = 0 \text{ m/s}$ )



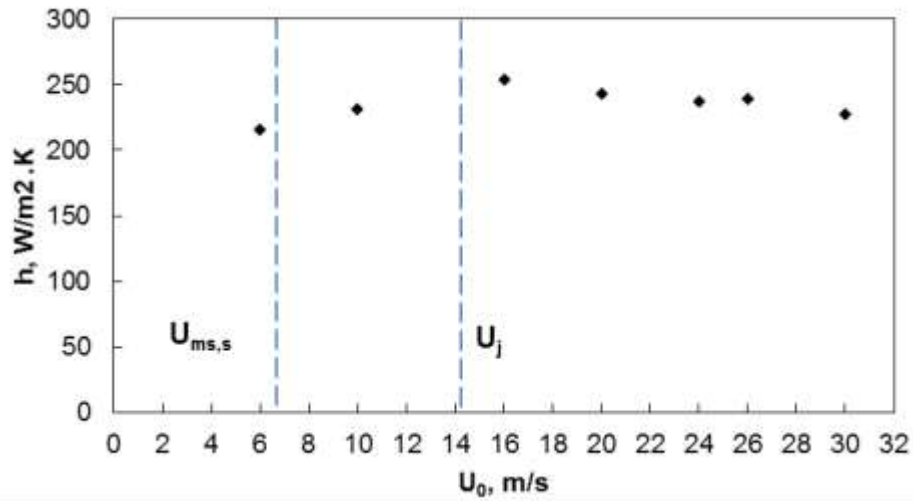
**Şekil 4.57.** Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_f = 3.58 \text{ m/s}$ )



**Şekil 4.58.** Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_f = 4.92$  m/s)

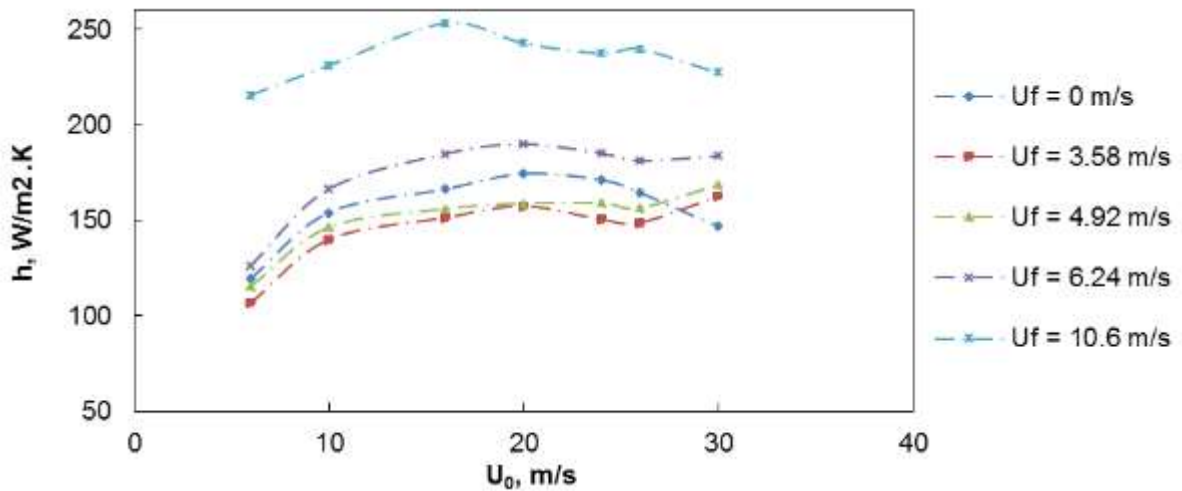


**Şekil 4.59.** Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_f = 6.24$  m/s)

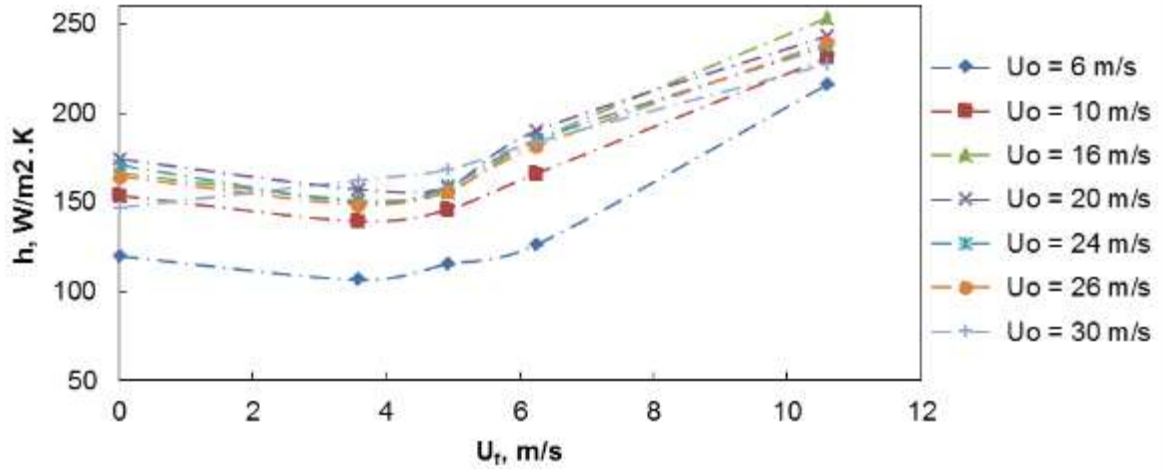


**Şekil 4.60.** Halka bölgesinde ısı transferi katsayılarının taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_F = 10.6$  m/s)

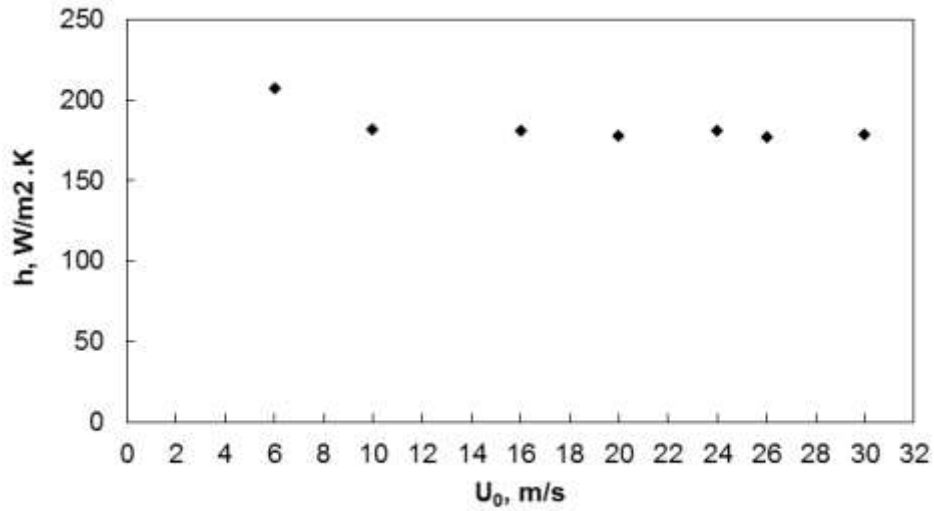
**Şekil 4.61** ve **4.62**'de ısı transferi katsayısının taşkınlaşma ve akışkanlaşma hızlarına göre değişimi tüm deney sonuçları için sunulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler ışığında, akışkanlaşma havasının halka bölgesinde ısı transferine pozitif bir artış sağladığı sonucuna varılmıştır. **Şekil 4.62**'den de görülebileceği üzere özellikle 4 m/s akışkanlaşma hızının üzerine çıkıldığında ısı transferi katsayısı halka bölgesinde belirgin bir artış göstermektedir. Taşkınlaşma havası ise ısı transferi katsayısını jet bölgesine kadar arttırmakta, jet bölgesinde ısı transferi katsayısı sabit kalmaktadır. Genel olarak hava hızının artırılması, parçacıkları hareketlendirip yüzey ile olan etkileşimlerini arttırdığı için ısı transferine pozitif etki yapmaktadır. Çok yüksek hava hızları ise yüzey etrafındaki parçacık konsantrasyonunu azalttığı için ısı transferini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla belirli bir hızda, yatak-yüzey ısı transferini bu iki fiziksel mekanizmanın göreceli ağırlıkları belirlemektedir.



**Şekil 4.61.** Halka bölgesinde ortalama ısı transferi katsayılarının farklı akışkanlaşma ( $U_F$ ) hızlarında değişimi.



**Şekil 4.62.** Halka bölgesinde ortalama ısı transferi katsayılarının farklı taşkınlaşma ( $U_0$ ) hızlarında değişimi.



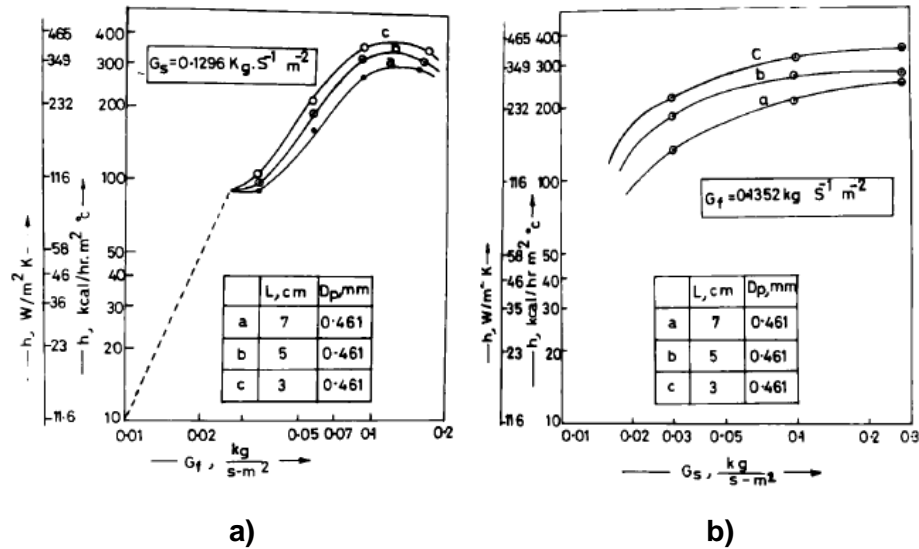
**Şekil 4.63.** Taşkın bölgesinde ısı transferi katsayılarının artan taşkınlaşma hızı ( $U_0$ ) ile değişimi ( $U_f = 0$ ).

Halka bölgenin aksine, taşkın bölgede ısı transferi taşkınlaşma hızına bağlı olarak bir değişiklik göstermemektedir (**Şekil 4.63**). Minimum kararlı rejime geçildikten sonra ısı transferi katsayısı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Yukarıda açıklandığı gibi hava hızının artması parçacık hareketini artırarak ısı transferine olumlu etki yapmakta fakat aynı zamanda yüzey çevresindeki parçacık konsantrasyonunu azaltarak ısı transferini olumsuz etkilemektedir. Hava hızının artmasıyla bu iki fiziksel etkinin birbirlerini dengelediği düşünülmektedir.



Deneylerde elde edilen sonuçları kısaca özetlemek gerekirse:

- Deneylerden elde edilen sonuçlara göre halka bölgesinde 100 ile 250 W/m<sup>2</sup>K arasında değişen ısı transferi katsayıları elde edilmiştir. Bu değerler literatürdeki değerlerle uyum göstermektedir (Chatterjee v.d., 1983). Taşkınlaşma havasının belli bir düzeyin üzerine çıkarılması halka bölgesinde ısı transferi katsayısını arttırmıştır. Akışkanlaşma havası ise jet bölgesine kadar ısı transferini arttırmış, jet bölgesinde ısı transferi katsayısında bir değişiklik gözlemlenmemiştir. **Şekil 4.64**'de bu konuda taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilen tek yüzey-yatak ısı transferi çalışmasının sonuçları gösterilmektedir (Chatterjee v.d., 1983)<sup>5</sup>. Mevcut çalışmada elde edilen trendler bu çalışmayla uyumludur.



**Şekil 4.64.** Değişen akışkanlaşma ve taşkınlaşma havalarında cam parçacıklar ( $d_p=0.461$  mm) için ısı transferi katsayısının değişimi a) akışkanlaşma havasının etkisi b) taşkınlaşma havasının etkisi (Chatterjee v.d., 1983)

- Taşkın-akışkan yatak ısı transferinden genel olarak iki fiziksel mekanizma bulunmaktadır. Genel olarak hava hızının artırılması, parçacıkları hareketlendirip yüzey ile olan etkileşimlerini arttırdığı için ısı transferine pozitif etki yapmaktadır. Çok yüksek hava hızları ise yüzey etrafındaki parçacık konsantrasyonunu azalttığı için ısı

<sup>5</sup> Bu çalışmanın akış borusuz bir taşkın-akışkan yatakta yapıldığı not edilmelidir.

transferini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla belirli bir hızda, yatak-yüzey ısı transferini bu iki fiziksel mekanizmanın göreceli ağırlıkları belirlemektedir.

- Taşkın bölgede akışkanlaşma hava hızından bağımsız olarak  $180 \text{ W/m}^2\text{K}$  civarında bir ısı transferi katsayısı mevcuttur.
- Taşkın-akışkan yatak ısı transferi mekanizmasının tam anlamıyla belirlenmesi amacıyla daldırılmış yüzey etrafında parçacık konsantrasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemlerle bunu gerçekleştirmek çok zordur; hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri uygulanabilir.

## 5 KURUTMA SİSTEMİ VE DENEYLERİ

### 5.1. Kurutma Sistemi

Kurutma sisteminin tasarımı soğuk sistemlerde yapılan detaylı hidrodinamik çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında gerçekleştirilmiştir. Kurutma deneyleri için kurulan deney sistemi **Şekil 5.1**'de şematik olarak gösterilmiştir. Kurutma sistemi üç ana bölümden oluşmaktadır: **akış borulu taşkın-akışkan yatak, hava ısıtıcı sistemi, ölçüm sistemleri**. Aşağıda bu kısımlar detaylı olarak açıklanmaktadır.

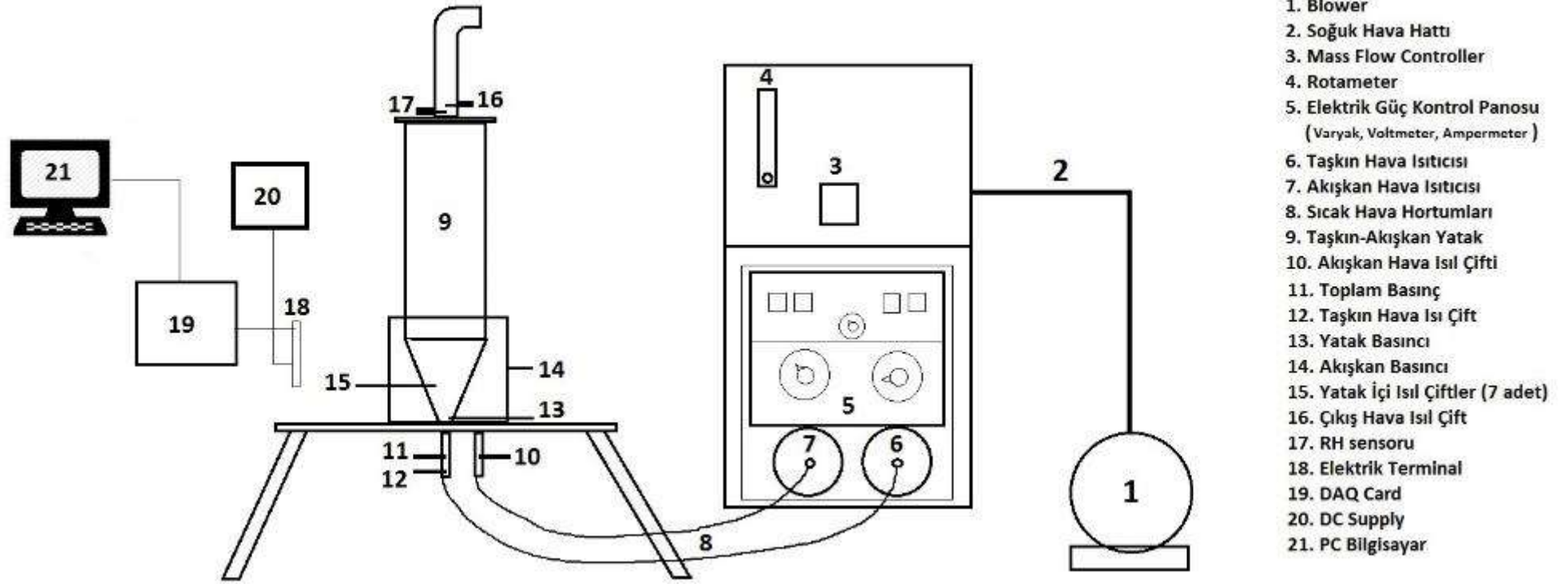
#### 5.1.1 Akış borulu taşkın-akışkan yatak

Kurutma sisteminin en önemli kısmı olan akış borulu taşkın-akışkan yatağın yapılan hidrodinamik çalışmalar sonunda 30 derecelik açığa sahip olmasına karar verilmiştir. Yatak, yüksek sıcaklık koşullarında dayanıklı bir şekilde çalışabilmesi için paslanmaz çelikten yapılmıştır. Yatağın konik ve silindirik üst kısımlarının 3 boyutlu çizimi ve fotoğrafı **Şekil 5.2**'de, geometrik ölçüleri ise **Çizelge 5.1**'de verilmiştir.

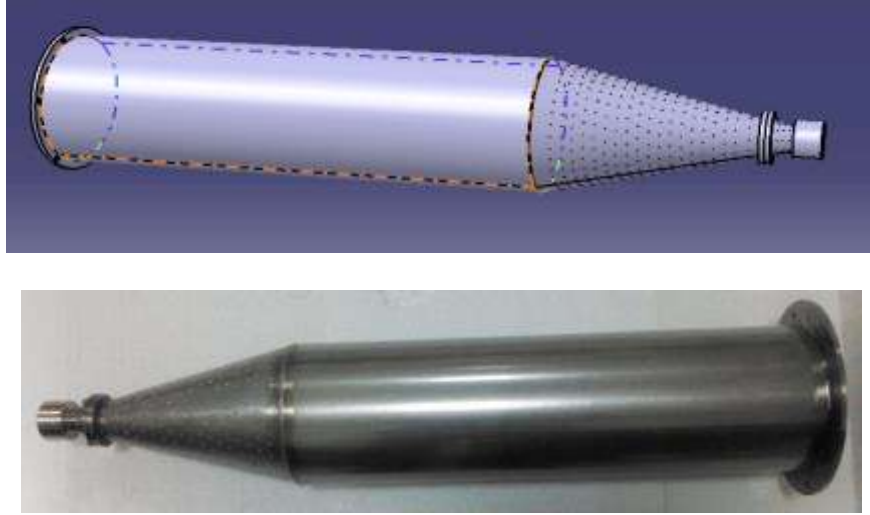
Yatağın konik kısmı istenilen açığa uygun olarak, paslanmaz sacı kalıp bir konik üzerinde bükerek ve temas noktalarını argon kaynağıyla birleştirerek yapılmıştır. Akışkanlaşma havasının yatak içerisine girişini temin etmek ve dağılımını homojen bir şekilde yapmak amacıyla konik kısmın yanal yüzeyinde 440 adet 1 mm çapında delik açılmıştır. Deliklerin toplam açıklık alanı toplam yanal alanın % 0.4'üne karşılık gelmektedir. Delikler yanal alanın tamamını kaplayacak bir şekilde açılmıştır. Ancak kullanılan akış borusunun yüksekliğine göre gereksiz havanın yatağın içine beslenmesini önlemek için kullanılmayan delikler sıcağa dayanıklı bant ile kapatılmıştır. Kurutma işlemleri için yatağa konulacak parçacıkların ortalama çapı (250 µm) deliklerin çapına göre daha küçük olması nedeniyle, parçacıkların yataktan dışarıya dökülmemesini sağlamak için sıcağa dayanıklı kumaş filtre kullanılmıştır.

Kurutma deneyleri sırasında farklı çapta ve uzunlukta akış borularının performansını belirleyebilmek için akış borusunun kolaylıkla yatağın içerisine monte edilebilir ve gerektiğinde kolaylıkla çıkarılabilir olması gerekmektedir. Bu amaçla konik kısma vidalanabilecek bir konik giriş parçası tasarlanmış ve imal edilmiştir. Konik giriş parçası konik kısmın uç tarafında ayrı bir parça olduğundan gerektiği zaman konik kısımdan ayrılabilmesi, akış borusunun yerleştirilebilmesinde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu parçanın boyutu ve yüksekliği uygun

bir şekilde tasarlanarak bir flanş ile konik bölgesine bağlanmıştır. Konik giriş parçasının fotoğrafı **Şekil 5.3**'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Kurutma deneylerinde kullanılan deney sisteminin şematiği



**Şekil 5.2.** Taşkın-akışkan yataklı kurutucunun konik ve silindirik kısımlarının üç boyutlu çizimi ve fotoğrafı.

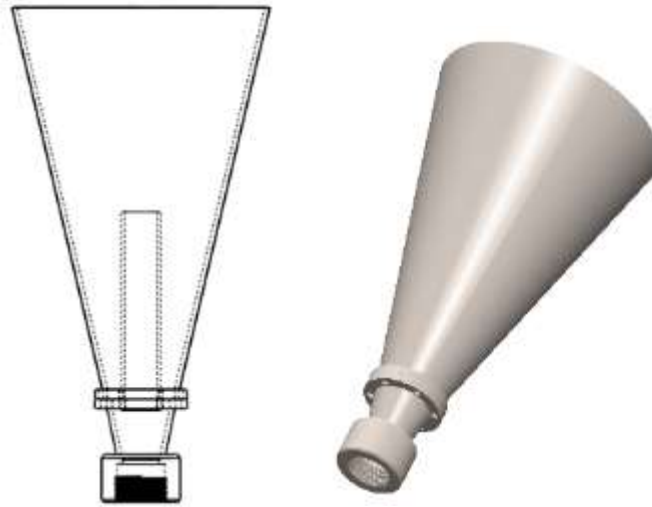
**Çizelge 5.1.** Kurutucunun geometrik ölçüleri

Parametreler	Değerler
Konik açısı ( $\gamma$ )	30°
Konik kısım yüksekliği ( $H_c$ )	285 mm
Konik giriş çapı ( $D_i$ )	23 mm
Konik kısım yüzey delik çapı	1 mm
Taşkın hava giriş çapı ( $D_o$ )	10 mm
Konik kısım yüzey delik sayısı	440
Konik kısım yüzey açıklık oranı	% 0.4
Silindir kısım iç çapı	168 mm
Akış borusu tutma nokta sayısı	3 adet
Silindir kısım yüksekliği	595 mm
Akışkan hava haznesi yüksekliği	335 mm
Akışkan hava haznesi iç çapı	230 mm
Malzeme saç kalınlığı	2 mm
Akış borusu iç çapı	23 mm
Akış borusu yüksekliği	değişken
Akış borusunun yatak girişinden yüksekliği	değişken
Üst hava çıkış çapı	55mm



**Şekil 5.3.** Konik giriş parçasının fotoğrafı

Akış borusunun tam merkezde tutulması çok önemlidir, çünkü eksenden oynaması yatak içerisindeki hidrodinamiği ve sonuç olarak fıskiye'nin oluşumunu ciddi bir biçimde etkilemektedir. **Şekil 5.4**'de akış borusunun yatak içerisinde yerleştirilmiş durumu ve giriş parçasının bağlandıktan sonraki konik kısmının teknik ve 3 boyutlu çizimleri verilmiştir.

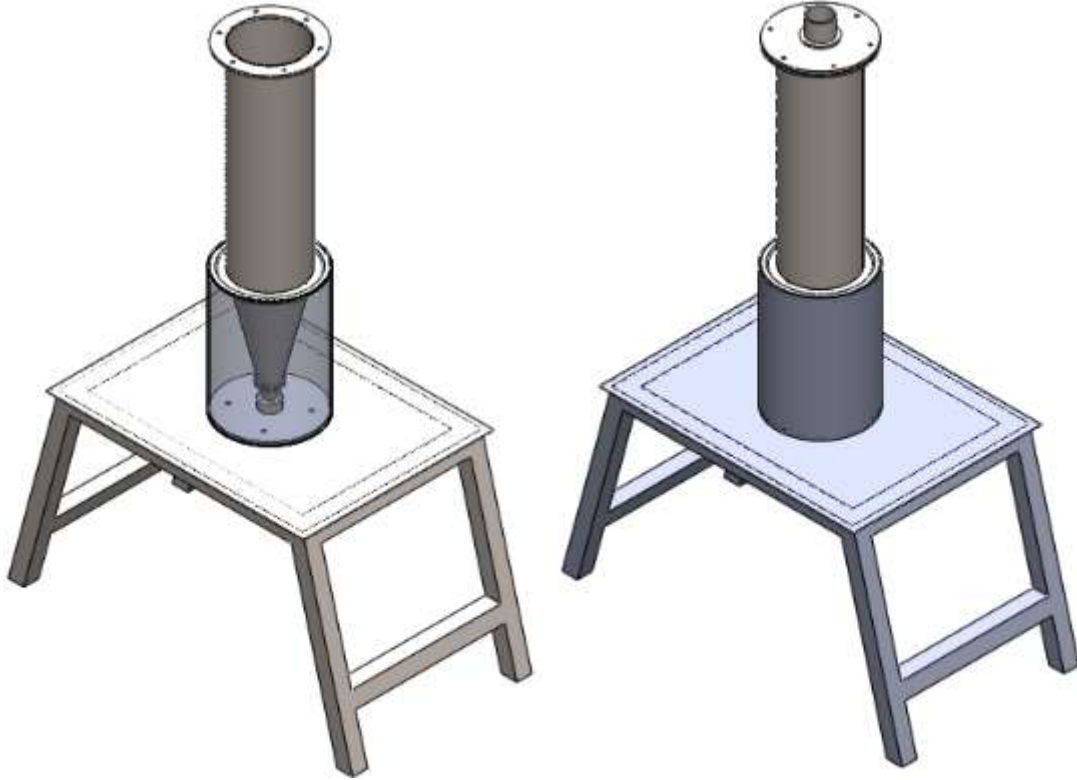


**Şekil 5.4.** Akış borusu ve giriş parçası bağlandıktan sonraki konik kısım teknik ve 3 boyutlu çizimleri

Akışkanlaşma havasının sisteme beslenebilmesi için konik kısmın etrafı daha büyük bir silindire kapatılarak bir hazne oluşturulmuştur. **Şekil 5.5**'te akışkanlaşma hava haznesinin 3 boyutlu çizimi sunulmuştur. Hava haznesinin iç çapı 235 mm, yüksekliği ise 335 mm'dir. Yatağın tamamlanmış 3 boyutlu çizimi **Şekil 5.6**'de sunulmuştur.



**Şekil 5.5.** Akışkanlaşma havası haznesi



**Şekil 5.6.** Yatağın tamamlanmış ve monte edilmiş durumu

Kurutma deneyleri sırasında kurutucunun tepesindeki gaz çıkış hattında sıcaklık ve bağıl nem ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Bu ölçümlerin ortam havasının neminden ve sıcaklığından etkilenmemesi için, dirsek şeklinde uzatılmış bir çıkış hattı tasarlanmıştır (Bakınız **Şekil 5.7**). Çıkış gaz sıcaklığının sabitlenmesi için ise bir adet kablo ısıtıcı ve



ayarlama varyağı kullanılmıştır. Bu sayede gaz çıkış noktasında meydana gelebilecek olası su buharı yoğunlaşması engellenmiştir.

Yatağın tümü ve hava hatları, boru şeklinde ve esnek olan kauçuk köpüğü kullanılarak izole edilmiştir. Deney sisteminin yalıtılmış hali aşağıdaki resimde gösterilmektedir.



**Şekil 5.7.** Deney setinin yalıtılmış hali

### 5.1.2 Hava Isıtıcı Sistemi

Kurutma işleminin gerçekleştirilebilmesi için sisteme beslenen havanın ısıtılması gerekmektedir. Bu amaçla, taşkınlaşma ve akışkanlaşma havaları için 2 ayrı hat tasarlanmıştır. Isıtıcı tasarımı, yüksek debilerdeki havayı göreceli olarak küçük bir hazne içerisinde daimi akış koşullarında yüksek basınç kaybına uğratmadan ısıtabildiği için elektrikli rezistans ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtıcıların tasarımı temas yüzeyini olabildiğince artırmak ve gerekli kapasiteyi düşürmek için rezistans kısmı spiral şeklinde yapılarak havanın spiralin orta ve etrafından geçerek ısınması sağlanmıştır. Yapılan ısı transferi hesapları sonucunda taşkınlaşma havası için 4000 W, akışkanlaşma havası için ise 3000 W'lık spiral ısıtıcılar yaptırılmıştır. Hesaplanan kapasiteler en yüksek sıcaklıklar için öngörülmüştür. Farklı sıcaklıklarda kararlı bir şekilde ısıtıcıların yükünün değiştirilerek çalıştırılabilmesi için varyaklar kullanılmıştır. Isıtıcılar silindirik ısıtma haznelerine monte edilmişlerdir. Taşkınlaşma havası için 70 cm uzunluğunda ve 164 mm iç çapı olan silindir kullanılmıştır. Kullanılan rezistans uzunluğu 60 cm ve spiral dış çapı ise 10 cm'dir. Akışkanlaşma havası için kullanılan silindirin uzunluğu ise 50 cm, iç çapı 146 mm'dir. Kullanılan rezistans uzunluğu 40 cm ve spiral dış çapı ise 10 cm'dir. Isıtıcı ve haznesinin 3 boyutlu çizimi **Şekil 5.8'**de verilmiştir.

Isıtıcıların çıkışlarından alınan sıcak havanın yatağa beslenmesi için esnek, 160 bar ve 135 °C sıcaklığına dayanıklı hortumlar kullanılmıştır. Deney sisteminin izolasyon yapılmadan önce çekilen fotoğrafı **Şekil 5.9**'da sunulmuştur.



**Şekil 5.8.** Hava ısıtıcısı ve haznesi



**Şekil 5.9.** Akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu

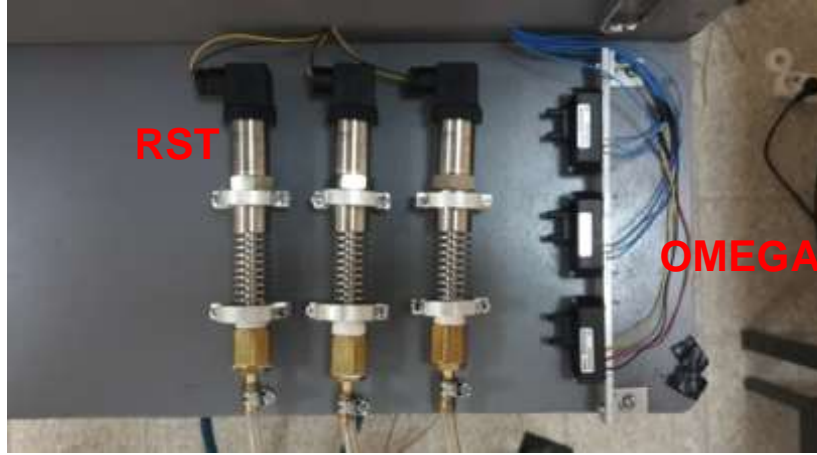
### 5.1.3 Ölçüm sistemleri

#### 5.1.3.1 Basınç Ölçerler

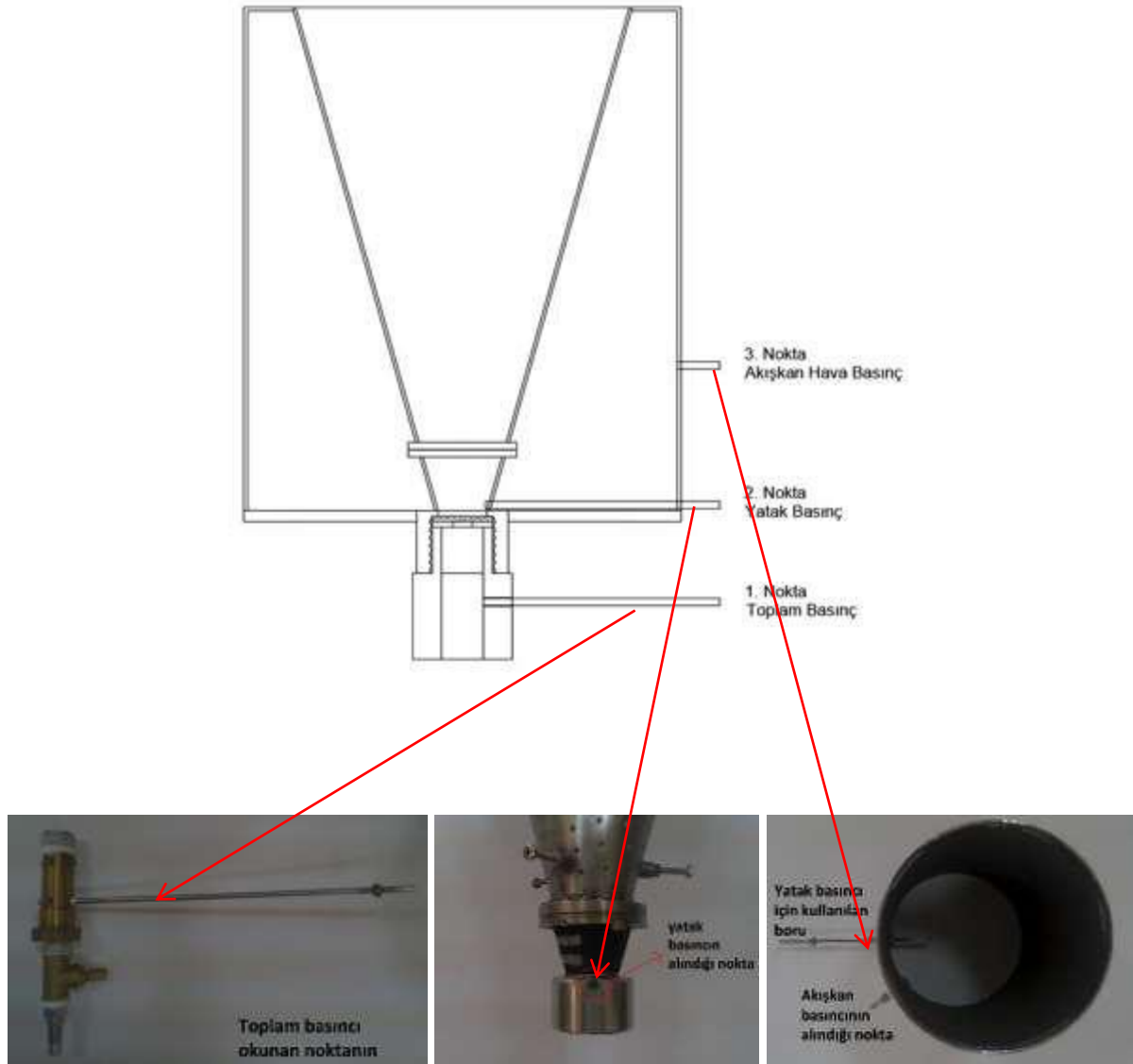
Kurutucu içinde **Şekil 5.11**'de görülebileceği gibi 3 ayrı noktadan basınç düşümü ölçülmüştür. 1. noktadan toplam basınç düşümü (giriş ve yatak), 2. noktadan yatak basınç düşümü, 3. noktadan ise akışkanlaşma hava haznesinin basıncı düşümü ölçülmektedir. Taşkınlaşma hava girişinde, havayı dağıtmak ve yatak malzemesinin giriş borusuna kaçmasını engellemek amacıyla 31 mm çapında ve 2.5 mm kalınlığında bir pirinç filtre pulu kullanılmıştır. Dolayısıyla toplam basınç düşümü pirinç pulu etrafındaki basınç kaybını da kapsamaktadır.

Yatak soğuk koşullarda çalıştırıldığında ise yarım yatak deneylerinde kullanılmış olan OMEGA marka basınç sensörleri kullanılmıştır (PX163-163PC0148 ve PX164- PC01D76 modelleri). Yatak sıcak koşullarda çalıştığında ise ısıya dayanıklı RST marka 1337361, 13171525, 13171519 model numaralı üç basınç ölçer (**Şekil 5.10**) kullanılmıştır. Bütün basınç ölçerlerin kalibrasyonu deneylerden önce yapılmıştır.

Basınç sensöründen elde edilen analog voltaj sinyali, yüksek hızda veri toplayabilen veri toplama kartı ile bir bilgisayara gönderilmiş ve LabVIEW® yazılımı ile işlenmiştir. Ölçümler, 1 kHz örnekleme frekansı ve 20 saniye örnekleme zamanında yapılmıştır. Her ölçüm 3 kere tekrarlanmış ve bu üç ölçümün ortalamaları rapor edilmiştir. WANG (2006) tarafından önerilen yöntem uygulanarak, sabit çalışma koşullarına ulaşabilmek için, ölçümlerden önce taşkın yataklar bir saat yüksek hava debisinde çalıştırılmıştır.



**Şekil 5.10.** RST ve OMEGA marka basınç ölçerler



**Şekil 5.11.** Yatak detayları ve basınç alınan noktalar (1. toplam basınç, 2. yatak basıncı ve 3. akışkan hava basıncı)

#### 5.1.3.2 Nem Ölçerler

Yatak içerisine giren ve çıkan havanın bağıl nem ve sıcaklığının ölçümü için Michell marka PCMini52 model ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kurutucunun çıkış noktasındaki nem ölçerin ucuna kurutma sırasında taşınan toz parçacıkların cihazı etkilememesi için bir filtre yerleştirilmiştir. Kullanılan modellerde bu filtre hazır bir şekilde cihazın ek parçası olarak verilmiştir.

Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için  $MgCl_2$  (magnezyum klorür),  $K_2CO_3$  (potasyum karbonat),  $NaCl$  (sodyum klorür),  $KCl$  (potasyum klorür),  $K_2SO_4$  (potasyum sülfat) olmak üzere 5 farklı tuzlu su çözeltisi hazırlanmıştır (**Şekil 5.12**). Bu çözeltilerin oda sıcaklığındaki denge bağıl nem

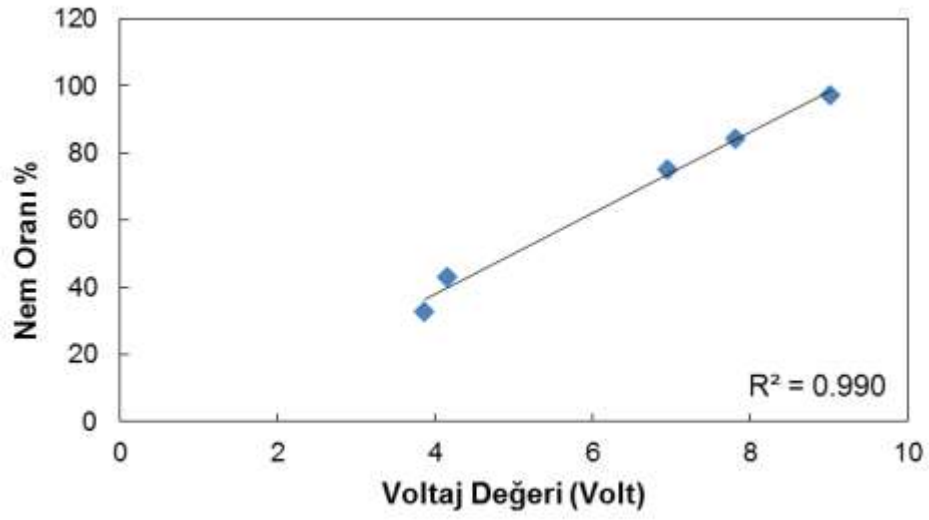
değerleri literatürde bulunmaktadır (**Çizelge 5.2**). Doygun tuz çözeltileri cam kavanozlar içine dökülerek tepe kısmında bulunan kapak teflon bant desteğiyle sıkıca kapatılmıştır. Kavanozun orta kısmına özel bir aparat hazırlanarak bağıl nem sensörü tepeden çözelti atmosferine herhangi bir gaz sızıntısı olmayacak şekilde sarkıtılmıştır. Sonrasında yaklaşık 2 saat boyunca sabit sıcaklıkta sensörün stabilizasyonu için beklenmiş ve bilinen bağıl nem değerine karşılık ölçüm sinyali kaydedilmiştir. Bu her tuz çözeltisi için tekrarlanmıştır. Her bir nem ölçer için elde edilen kalibrasyon eğrisi **Şekil 5.13** **Şekil 5.15**'de sunulmuştur.



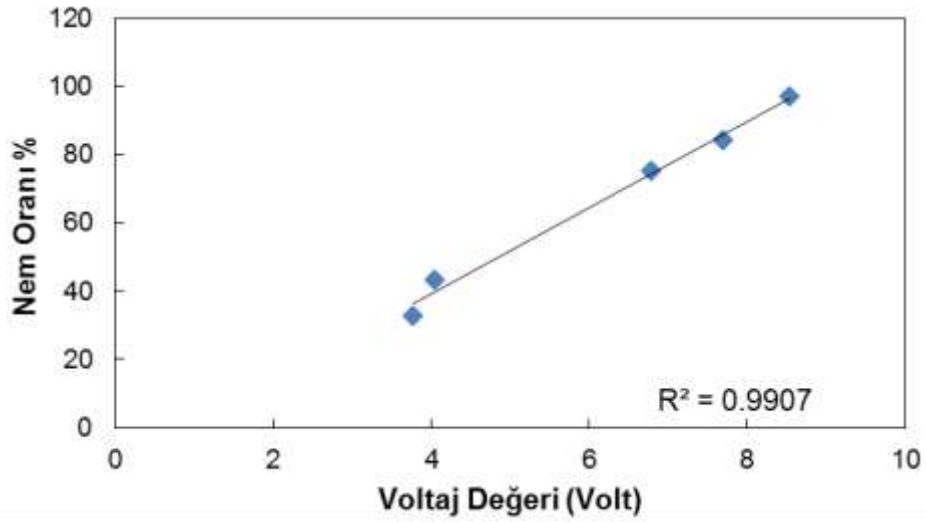
**Şekil 5.12.** Kalibrasyon sırasında farklı çözeltilere sahip tuz kavanozlarına nem ölçerin yerleştirilmesi

**Çizelge 5.2.** Kullanılan tuzların oda sıcaklığında (25 °C) kavanoz içinde oluşturdukları denge nem değerleri

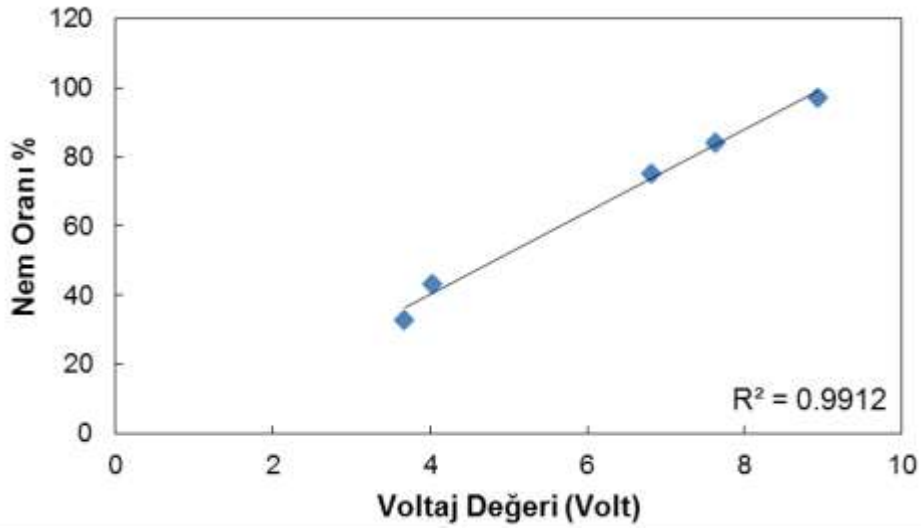
Tuzlar	% RH
MgCl <sub>2</sub>	32.8
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.2
NaCl	75.3
KCl	84.3
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97.3



Şekil 5.13. SN286577 modeli için elde edilen kalibrasyon eğrisi



Şekil 5.14. SN286578 modeli için elde edilen kalibrasyon eğrisi



**Şekil 5.15.** SN286582 modeli için elde edilen kalibrasyon eğrisi

#### 5.1.3.3 Isıl Çiftler

Yatak hava giriş ve çıkış sıcaklıkları ve yatak içerisindeki sıcaklık dağılımı ısı çiftleri ile ölçülmektedir. Yatak giriş sıcaklığı aynı zamanda ısıtıcı çıkış sıcaklığına da eşit olduğu için ısıtıcı kontrolü için de kullanılacaktır. Yatak hava giriş ve çıkış sıcaklıkları iki adet J tipi ısı çifti ile ölçülmektedir.

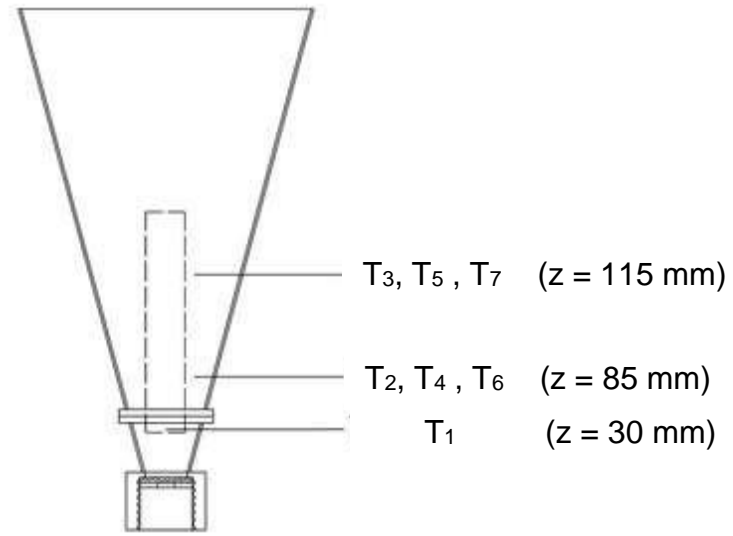
Kurutma sırasında yatak içerisinde sıcaklıkların dağılımını gözlemleyebilmek için konik kısmının farklı noktalarında ısı çiftlerinin yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu ısı çiftlerinin parçacıkların hareketini engellememesi ve yatak hidrodinamiğini ciddi bir şekilde etkilememeleri için oldukça ince olmaları gerekmektedir. Bu amaçla 0.01 inch (0.25 mm) çapında ve 12 inç uzunluğunda olan OMEGA firmasının J tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Oldukça ince olan bu termociftler çok düşük tepki zamanına da sahiptirler (**Şekil 5.16**).



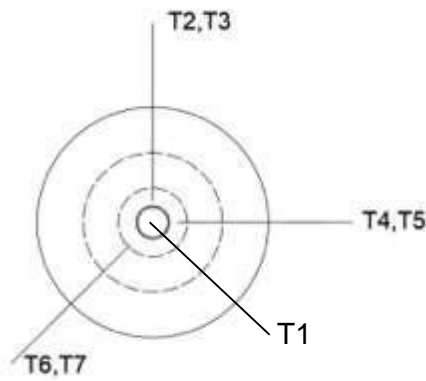
**Şekil 5.16.** OMEGA marka yatak içerisinde kullanılacak ısı çiftlerinin görüntüsü (OMEGA)



Sıcaklık dağılımının radyal ve aksiyel yönde belirlenmesi için 6 adet ısı çiftinin yatak içerisine iki farklı yükseklikte ve üç farklı radyal uzaklıkta (akış borusuna yakın, halka bölgesi orta kısmı, duvara yakın) yerleştirilmiştir. Ayrıca akış borusunun tam girişine de bir ısı çifti yerleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde (**Şekil 5.17** ve **Şekil 5.18**) yatağın teknik çizimi üzerinde yatak ısı çiftlerinin yerleştirilme noktaları belirtilmiştir. Şekiller üzerinde gösterilen sıcaklık ölçüm noktalarının akış borusunun merkezinden olan uzaklıkları **Çizelge 5.3**'de verilmektedir.



**Şekil 5.17.** Yatak ısı çiftlerinin yatak içinde aksiyel yerleştirilme noktaları (7 adet)



**Şekil 5.18.** Yatak ısı çiftlerinin yatak içindeki pozisyonları (7 adet)

**Çizelge 5.3.** Sıcaklık ölçüm noktalarının akış borusunun merkezinden olan uzaklıkları

Isıl çift	Akış borusunun merkezinden olan uzaklığı, r (mm)
$T_1$	0
$T_2$	16.5
$T_3$	16.5
$T_4$	28.5
$T_5$	32.0
$T_6$	36.5
$T_7$	52.0

#### 5.1.3.4 Hava Debisi Ölçümleri

Deneyisel sırasında gerekli olan hava Yiğitsan marka (Model YVK 25) 18.5 kW'lık bir vidalı kompresörden laboratuvara gelmektedir. Kompresör maksimum 8 bar basınca ulaşabilmekte ve 3100 lt/dak (standart hava şartlarında) hava debisi sağlayabilmektedir. Soğuk deneyler sırasında, taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava debisi ölçümleri sırasıyla Dwyer 0-200 SCFH ve Cole-Parmer (150 mm direct reading, 50000 ml/min) akış ölçerleri ile yapılmıştır. Kurutma deneyleri sırasında ise daha kontrollü ve hassas bir şekilde yatağa beslenen havanın debisini değiştirebilmek için, analog girişli Omega marka bir kütle akış ölçer (mass flow controller) cihazı kullanılmıştır. Deneyler sırasında akışın debisinin kontrolü LabVIEW® yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

#### 5.1.3.5 Veri Toplama Sistemi

Hava debisi dışındaki tüm ölçümlerden elde edilen analog sinyaller yüksek hızda veri toplayabilen veri toplama kartı ile bir bilgisayara gönderilmiş ve LabVIEW® yazılımı ile işlenmiştir. Veri toplama için National Instruments SCXI-1102C şasesine SCXI-1303 board kartı ile beraber SCXI-1102C kartı bağlanmıştır. Kullanılan özel ısı çiftlerinin ölçümlerinin hassas bir şekilde yapılabilmesi için veri toplama sistemine bir yükseltici (amplifier) ve alçak geçiren filtre (low-pass filter) eklenmiştir.

## 5.2 Kurutma Deneyleri

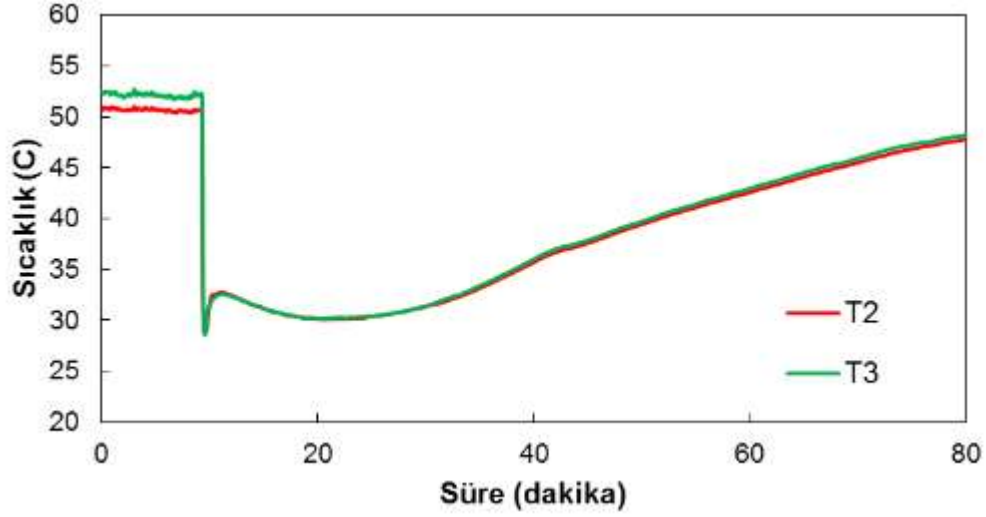
Kurutma deneylerinde taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava debileri ile giriş hava sıcaklığının zeolitin kuruma dinamiğine ve zamanına etkileri incelenmiştir. Deneylerde kullanılan taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava debilerinin belirlenmesinde soğuk sistemlerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen minimum kararlı taşkınlaşma hızları göz önünde bulundurulmuştur. Taşkınlaşma hızının ( $U_o$ ), minimum kararlı taşkınlaşma hızından yüksek jet taşkınlaşmanın başladığı hızlara yakın olacak şekilde 6, 8 ve 10 m/s olarak değiştirilmesine karar verilmiştir. Akışkanlaşma hızları ( $U_f$ ) için ise önceden yapılan hidrodinamik çalışmalarda gibi  $U_f = 0, 2, 4$  m/s kullanılmıştır.  $U_f = 0$  m/s koşulu yatağın sadece taşkın yatak olarak çalıştığı koşulu göstermektedir. Giriş hava sıcaklığının zeolitin kuruma zamanına olan etkisinin incelenmesi için deneyler 3 ayrı giriş sıcaklığında (40, 60, 90°C) gerçekleştirilmiştir.

Kurutma deneyleri 320 gr zeolit kullanılarak yapılmıştır. Bu malzeme miktarı ile statik yatak yüksekliği 130 mm'ye karşılık gelmektedir. Her deneyden önce 320 gr kuru malzemeye yaklaşık 38 gr su eklenerek nem değeri %18'e yükseltilmiştir. Zeolit yaklaşık %8 (yaş temel) nem içeriğine kadar kurutulmaktadır. Sisteme konulmadan önce ve deneyden sonra zeolitin nemi, proje kapsamında alınan halojen ısıtmalı nem tayin cihazında (Ohaus Corp. MB45) ölçülmüştür. Raporun önceki bölümlerinde de bahsedildiği gibi bu çalışmanın temel amacı nemli klinoptilolit parçacıklarını etkili bir şekilde %8 (yaş temel) nem içeriğine kadar kurutmaktır. Bu nedenle raporun ilerleyen kısımlarında bahsi geçen nem içeriği temel alınarak kurutma süreleri tayin edilmiştir ve karşılaştırmalar bu yönde yapılmıştır.

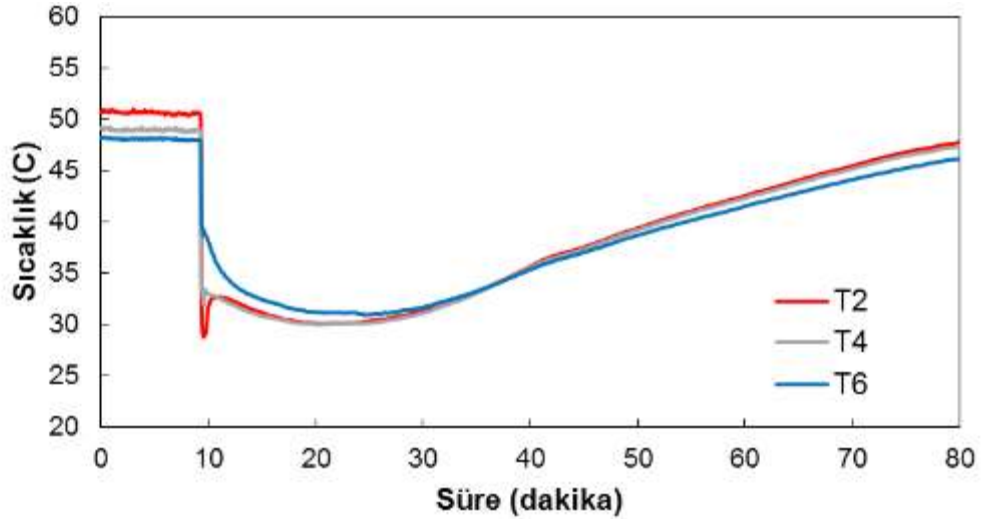
İşletme koşullarının kurutma performansına olan etkisinin belirlenmesinde nem oranının ve kuruma hızının zamana bağlı değişimi ile kuruma süresi incelenmiştir. İşletme sırasında yatak içindeki parçacıkların nem miktarının zamana bağlı olarak değişiminin ölçülebilmesi için sistemden değişik zaman aralıklarında numune almak gerekmektedir. Bu numunenin içeriği alındığı noktaya göre anlık farklılıklar gösterebilir. İşletim sırasında birçok değişik noktadan değişik zamanlarda numune alınması yatak hidrodinamiğini olumsuz etkileyip gaz kaçaklarının oluşmasına sebep olabilir. Dolayısıyla, bu çalışmada kesikli işletilen taşkın-akışkan yatağın içinde tam karışma olduğu varsayılmış ve nem oranı değişimi Ek A'da detayları verilen model kullanılarak hesaplanmıştır. Kuruma hızının hesaplanış yöntemi de Ek A'da verilmektedir.

Deneyler sırasında **Şekil 5.11**'de gösterildiği gibi 3 ayrı noktada basınç düşümü, **Şekil 5.17****Şekil 5.18**'de gösterildiği gibi 7 noktada sıcaklık ölçülmüştür. Deneyler sırasında yatağa zeolit eklenmeden önce sistem yaklaşık olarak 10 dakika sıcak hava ile çalıştırılarak sistem

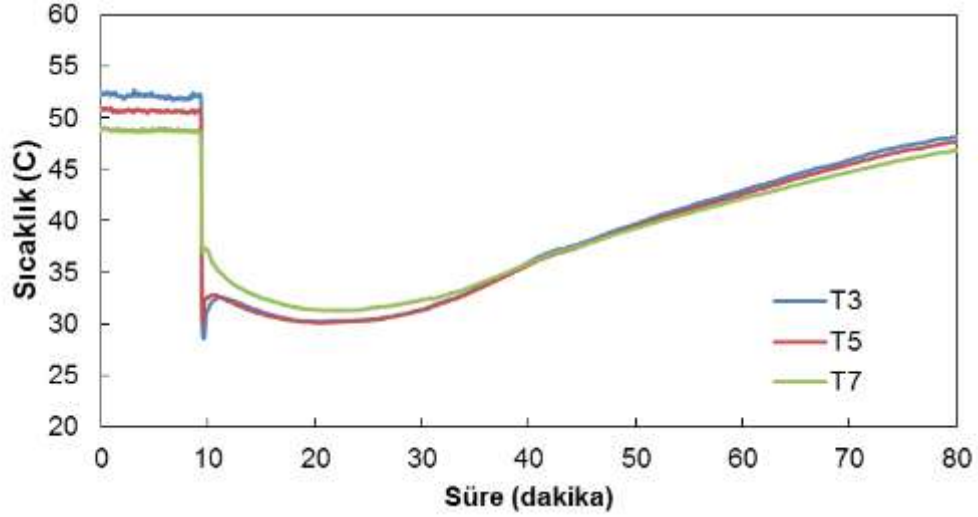
içi sıcaklığının giriş sıcaklığına eşit olması sağlanmıştır. Daha sonra sistemin üst kapağında yer alan tıpa açılarak yatağa zeolit yüklenmiştir. **Şekil 5.19** **Şekil 5.21**'de  $U_o = 6$  m/s,  $U_f = 2$  m/s ve giriş hava sıcaklığı  $60^\circ\text{C}$  iken yapılan deney sırasında ölçülen zamana bağlı sıcaklık dağılımları örnek olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.19.** Eksenel sıcaklık dağılımı



**Şekil 5.20.** Radyal sıcaklık dağılımı ( $z = 85$  mm,  $U_f = 2$  m/s)

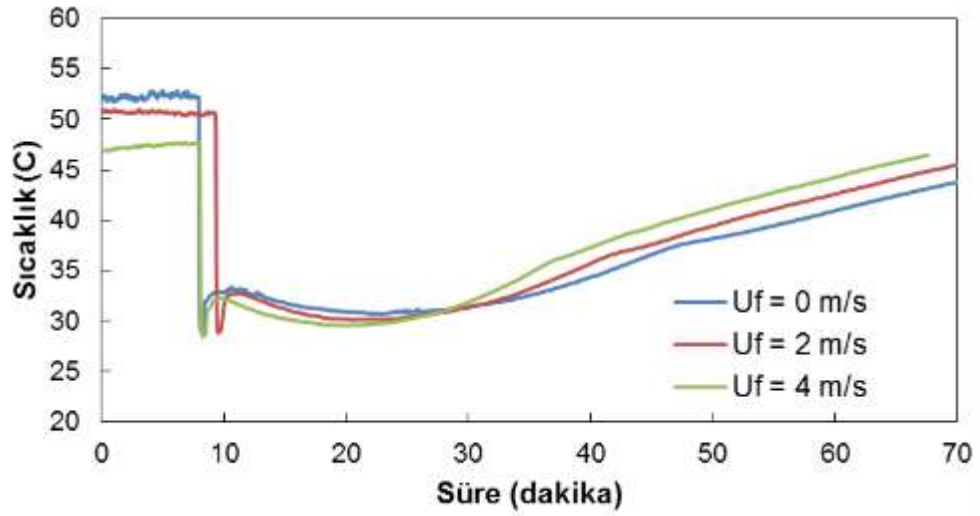


**Şekil 5.21.** Radyal sıcaklık dağılımı ( $z = 115$  mm,  $U_f = 2$  m/s)

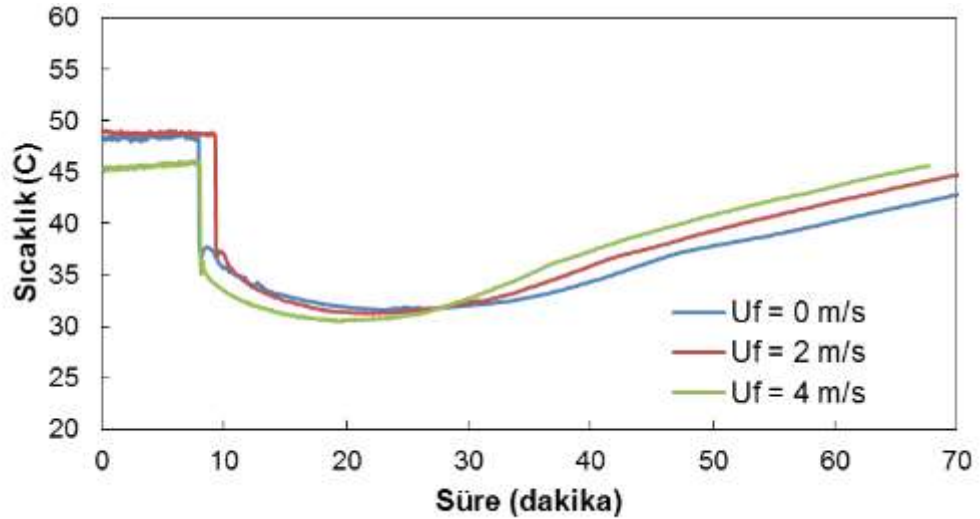
Grafiklerden de görülebileceği gibi, deney başında malzeme yatak içine beslenmeden önce yatak boş olarak yaklaşık 10 dakika sıcak gaz ile ısıtılmıştır. Bu süre sonunda yatak içi sıcaklığı bütün ölçüm noktalarında giriş hava sıcaklığına yakın ( $\pm 5-10^\circ\text{C}$ ) değerlere yükselmiştir. Yaklaşık oda sıcaklığında olan malzemenin sisteme konulması ile ise sıcaklıklar ciddi bir şekilde düşmektedir. Malzemenin yatak içinde ısınması ve nemini kaybetmesiyle deney sonuna doğru sıcaklıkların tekrar arttığı görülmektedir.

Bütün şekiller incelendiğinde, yatak içinde sıcaklık değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Yatak içi eksenel sıcaklık dağılımlarına bakıldığında sıcaklığın, akış borusuna yakın kısımda yatak yüksekliği boyunca belirgin miktarda değişmediği görülmektedir. Radyal değişimlere bakıldığında ise, konik duvara yaklaştıkça sıcaklığın son derece az miktarda arttığı görülmektedir. Bu da yatak içinde termal olarak homojen bir ortam yaratıldığını ve kurutmanın hemen hemen her noktada benzer şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu sonuç, taşkın-akışkan yatak sisteminin önemli bir avantajını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar diğer taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava hızlarıyla yapılan deneylerde de elde edilmiştir.

**Şekil 5.22** **Şekil 5.23**'de akışkanlaşma hava hızının sıcaklık dağılımına olan etkisi gösterilmektedir. Karşılaştırma için akış borusuna yakın ve  $z = 85$  mm yükseklikte alınmış olan  $T_2$  ölçümü ve konik duvara yakın ve  $z = 115$  mm yükseklikte alınmış olan  $T_7$  ölçümü gösterilmektedir. Bu şekillerden, akışkanlaşma hızı arttıkça yatak içi sıcaklığın arttığı görülmektedir. Benzer sonuçlar diğer radyal ve eksenel noktalarda alınan sıcaklık dağılımları için de gözlemlenmektedir.



**Şekil 5.22.** Akışkanlaşma hava hızının  $T_2$  sıcaklığına olan etkisi (Akış borusuna yakın bölgede,  $r = 16.5$  mm ve  $z = 85$  mm)

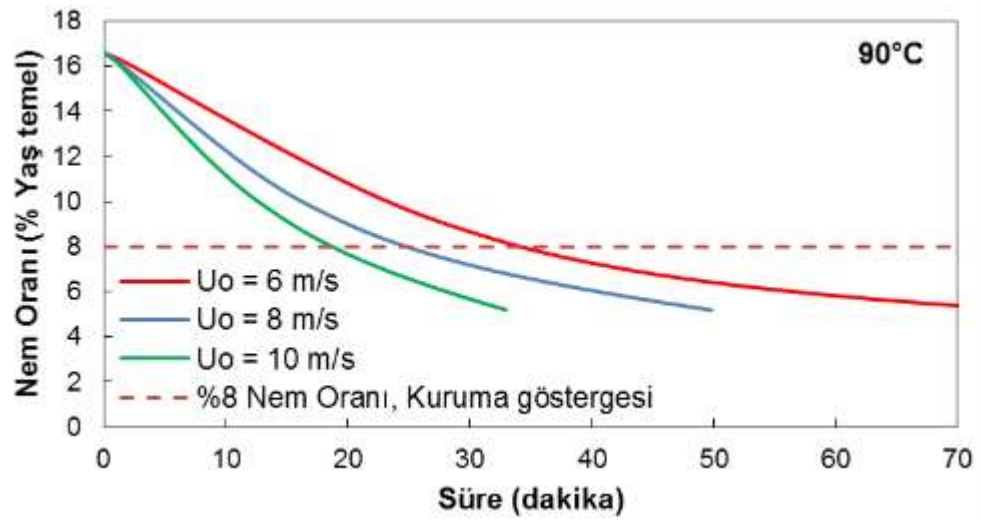
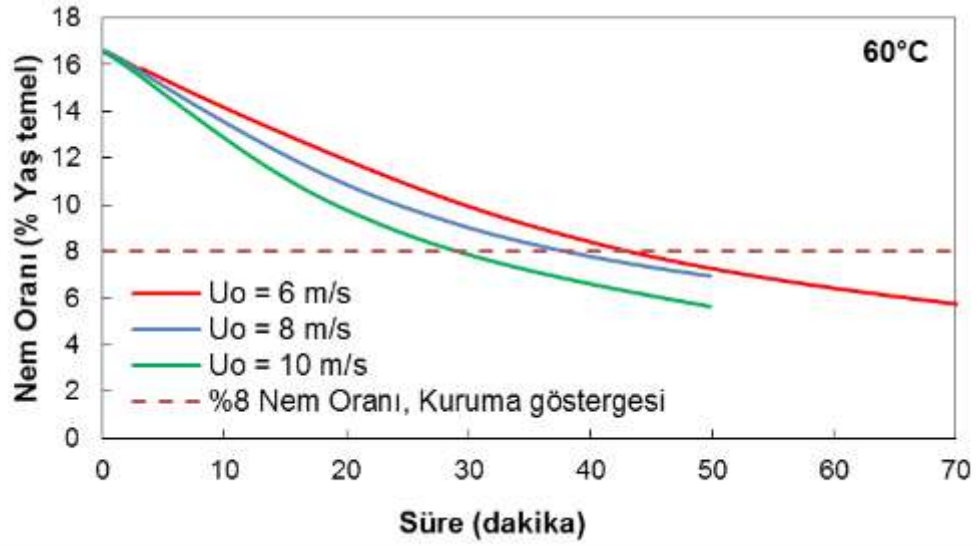
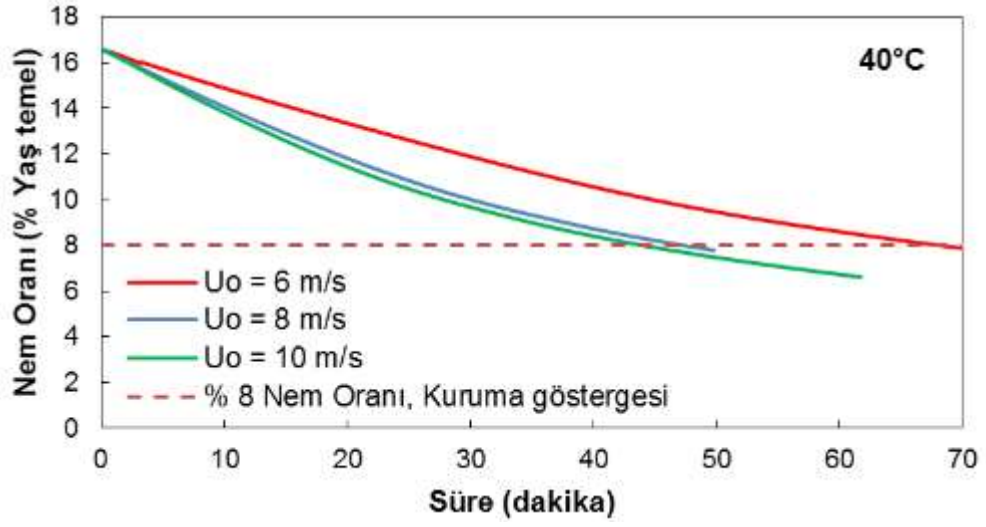


**Şekil 5.23.** Akışkanlaşma hava hızının  $T_7$  sıcaklığına olan etkisi (Konik duvara yakın bölgede,  $r = 52$  mm ve  $z = 115$  mm)

Taşkınlaşma hava hızının kurutmaya olan etkisi öncelikle sisteme akışkanlaşma havası verilmeden yani yatak taşkın yatak olarak çalıştırıldığında incelenmiştir. **Şekil 5.24'**de taşkınlaşma hızının kuruma eğrilerine, **Şekil 5.25'**de ise kuruma hızına olan etkisi gösterilmektedir. Taşkınlaşma hava hızının etkisi 3 ayrı giriş hava sıcaklığında incelenmiş ve bu şekillerde gösterilmektedir. Bütün şekiller incelendiğinde, gaz giriş sıcaklığı fark etmeksizin, taşkınlaşma hava hızı artırıldığında kuruma süresinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir.

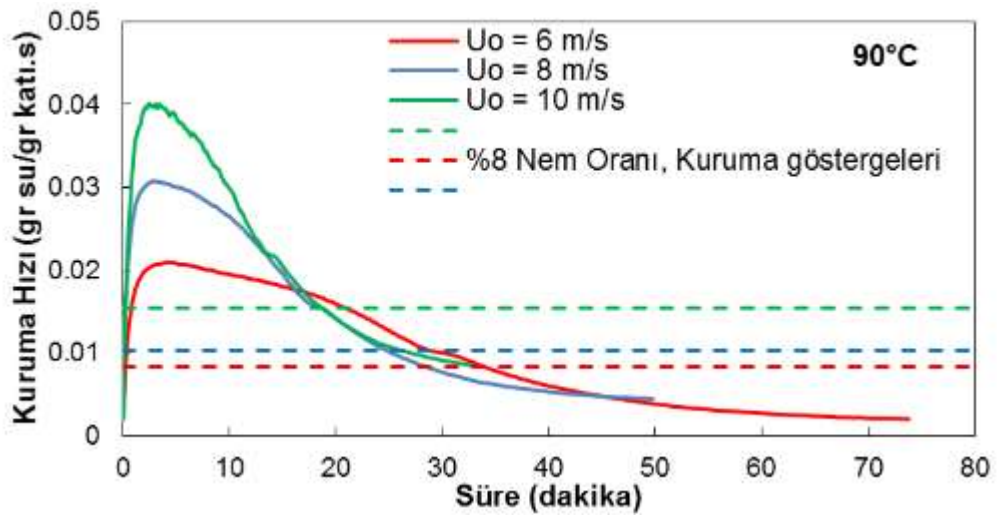
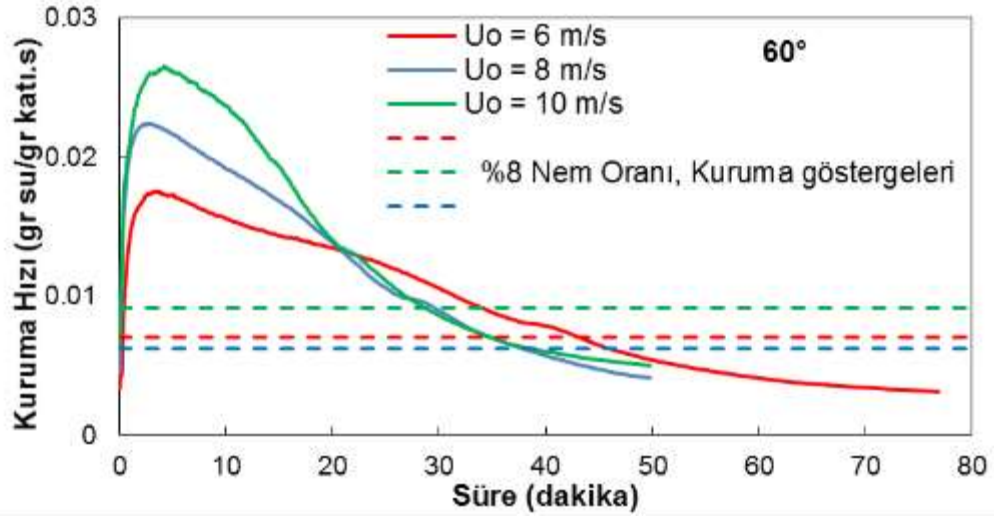
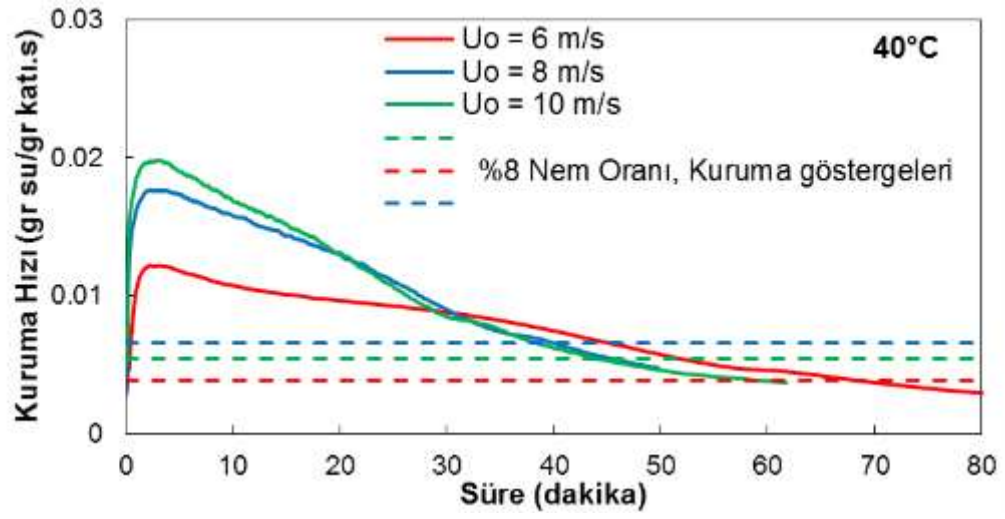
Kurumanın büyük bir kısmının gerçekleştiği deneylerin ilk 20-30 dakikasında taşkınlaşma hızı arttıkça kuruma hızının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

**şekil 5.26** ve **şekil 5.27**'de taşkınlaşma hava hızının kurumaya olan etkisi sistem taşkın-akışkan yatak olarak çalıştırıldığında da incelenmiştir. Bu amaçla yatağın yan çeperinde 2 m/s hız ile akışkanlaşma havası verilmiştir. Sistem taşkın-akışkan yatak olarak çalıştırıldığında da taşkınlaşma hava hızı arttırıldığında kuruma süresi düşmekte, kurutma hızı artmaktadır. Akışkanlaşma havasının sisteme beslenmesiyle taşkınlaşma havasının kurumaya olan etkisinin **şekil 5.24** ve **şekil 5.25**'de görölen tabloya kıyasla daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir.

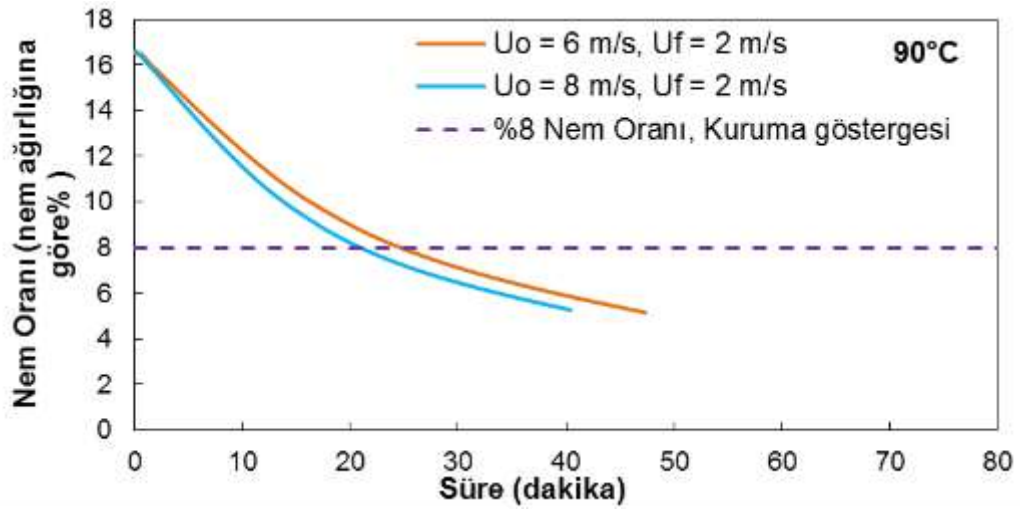
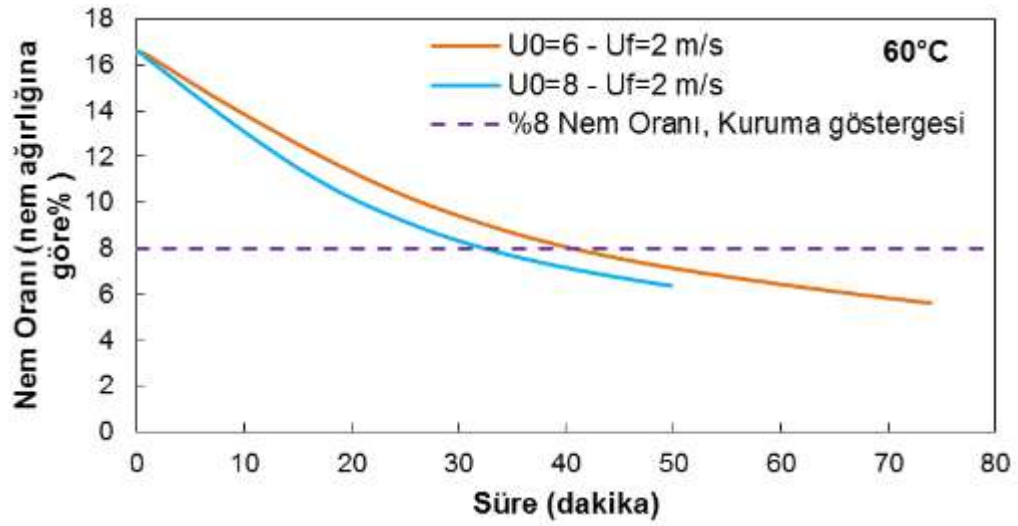
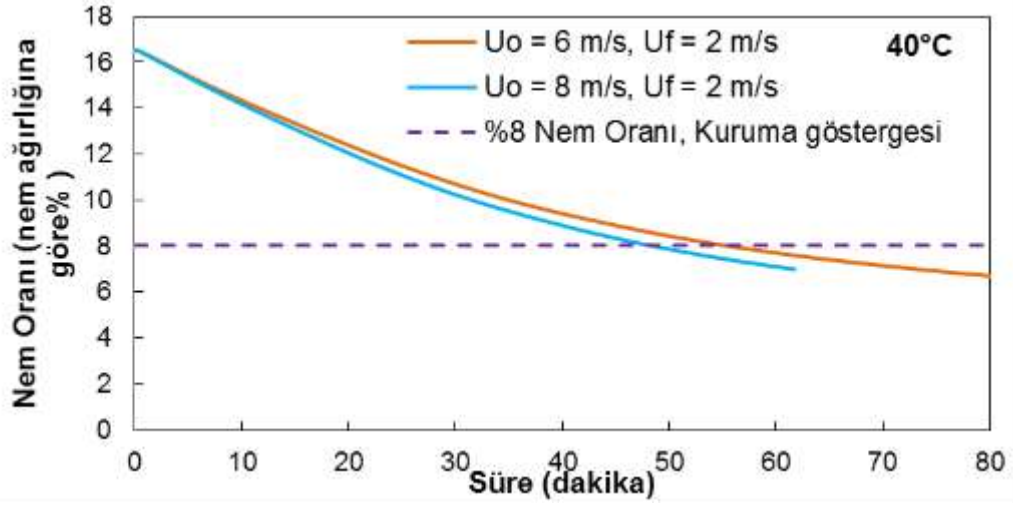


**Şekil 5.24.** Taşkın hava hızının kuruma eğrilerine olan etkisi ( $U_o = 6 \text{ m/s}$ ,  $U_f = 0 \text{ m/s}$ )

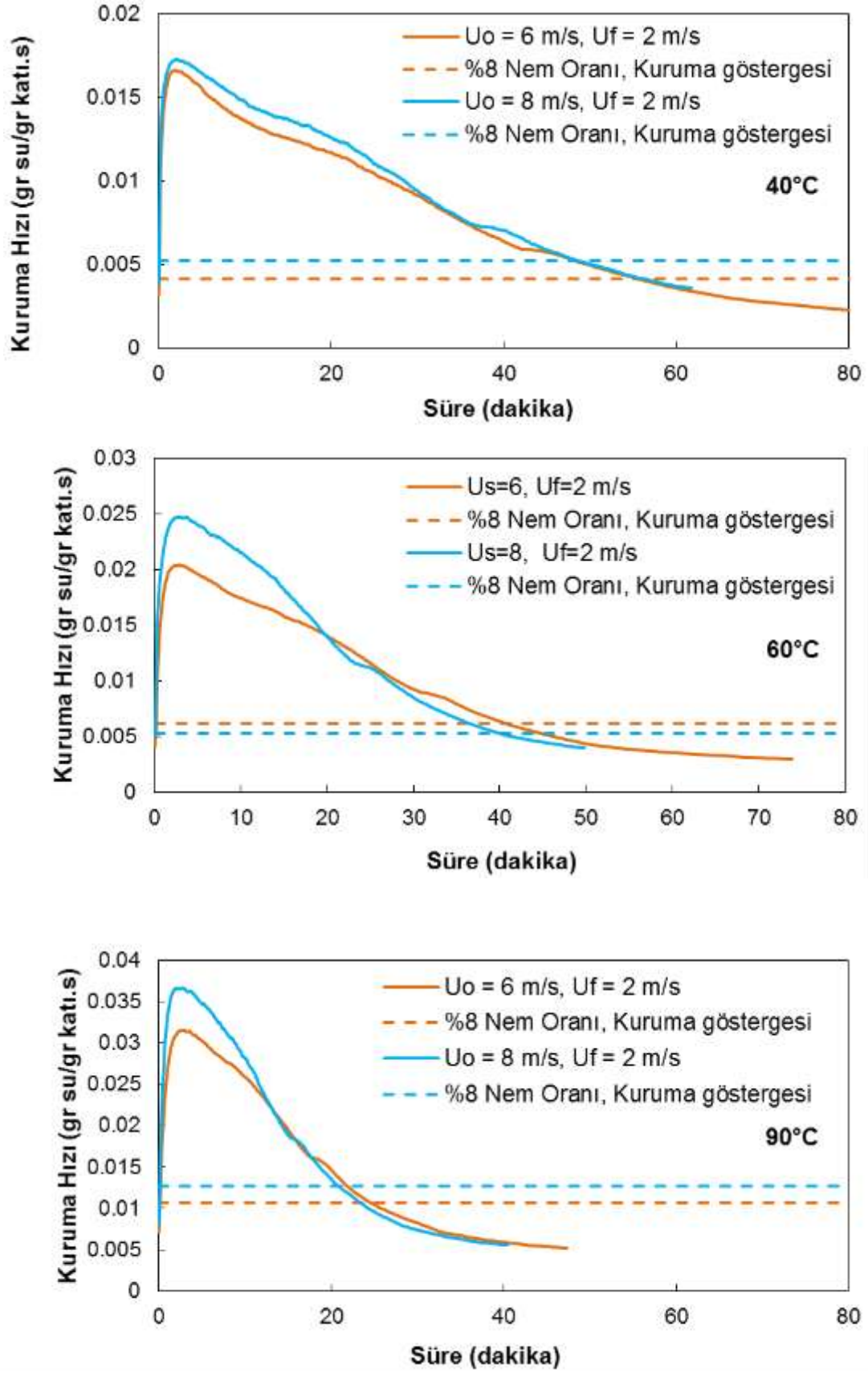




Şekil 5.25. Taşkın hava hızının kuruma hızına etkisi ( $U_o = 6$  m/s,  $U_f = 0$  m/s)



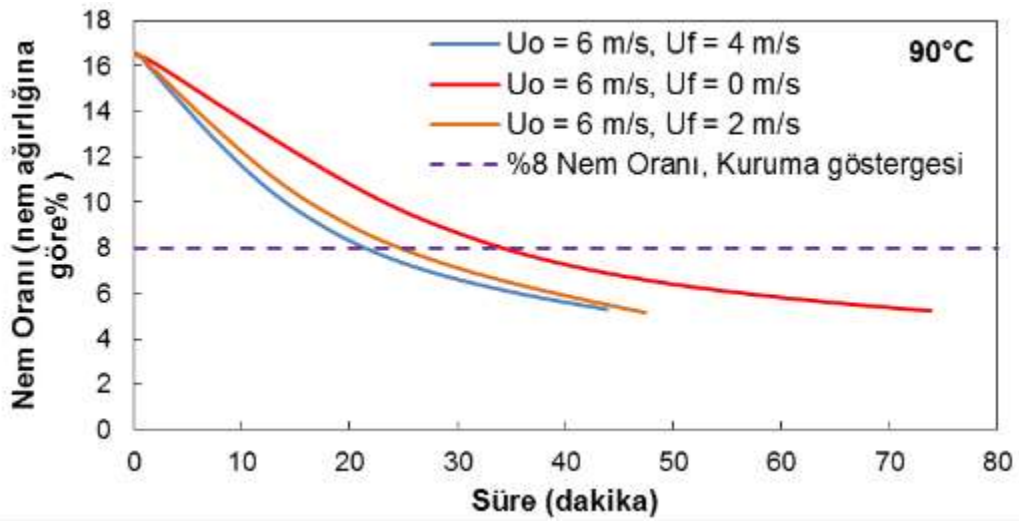
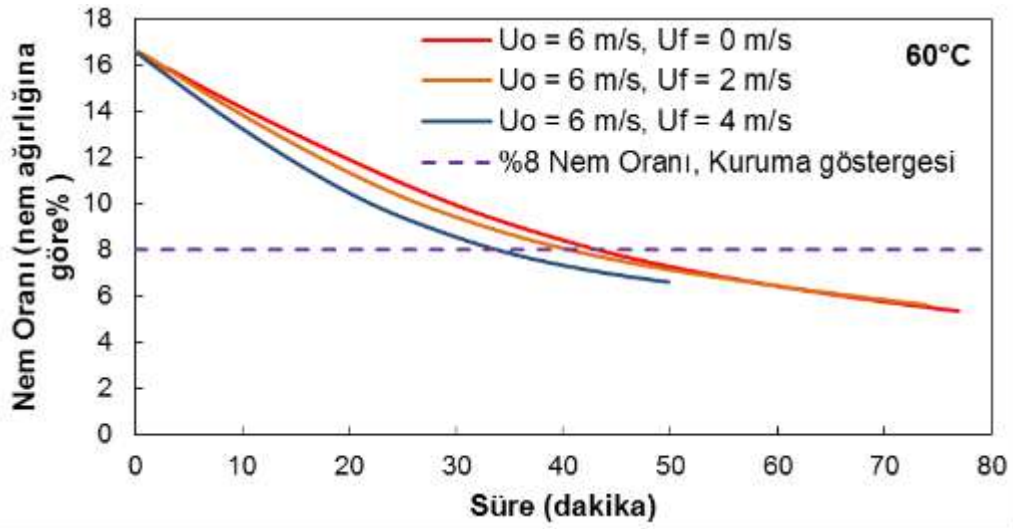
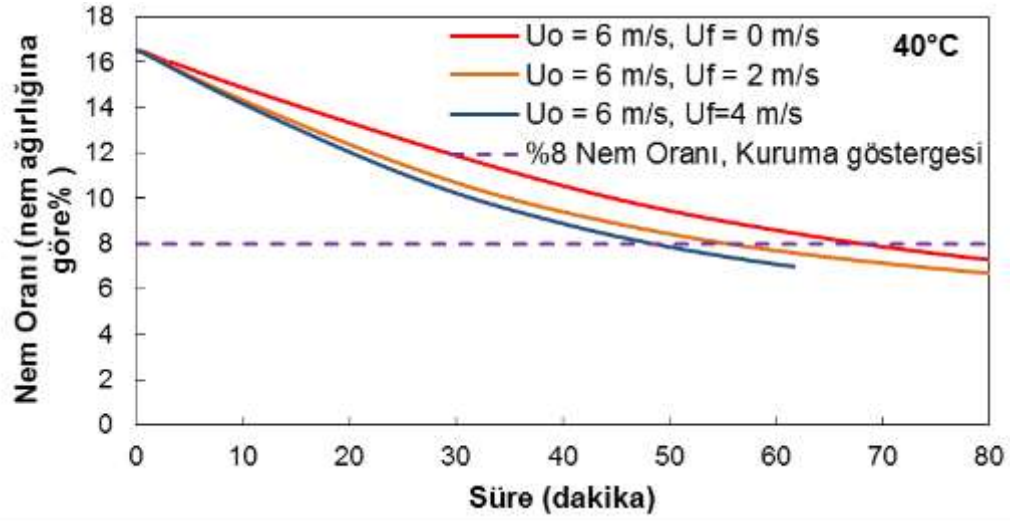
Şekil 5.26. Taşkın hava hızının kuruma eğrilerine olan etkisi (U<sub>0</sub> = 6 m/s, U<sub>f</sub> = 2 m/s)



Şekil 5.27. Taşkın hava hızının kurutma hızına etkisi ( $U_o = 6$  m/s,  $U_f = 2$  m/s)

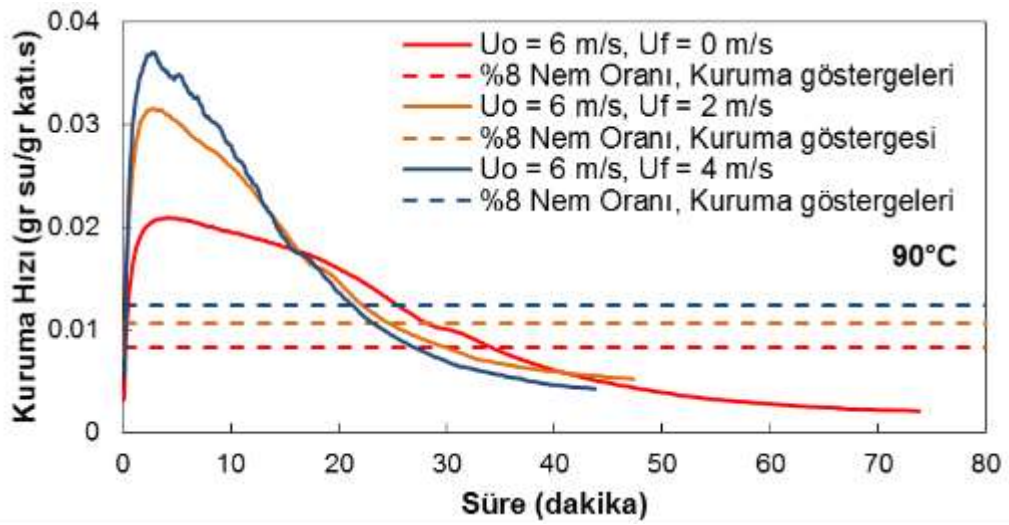
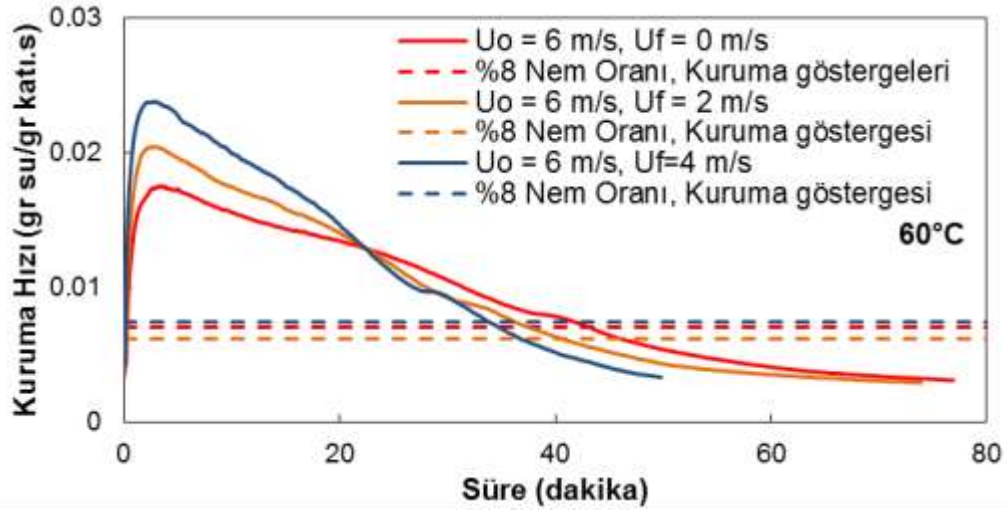
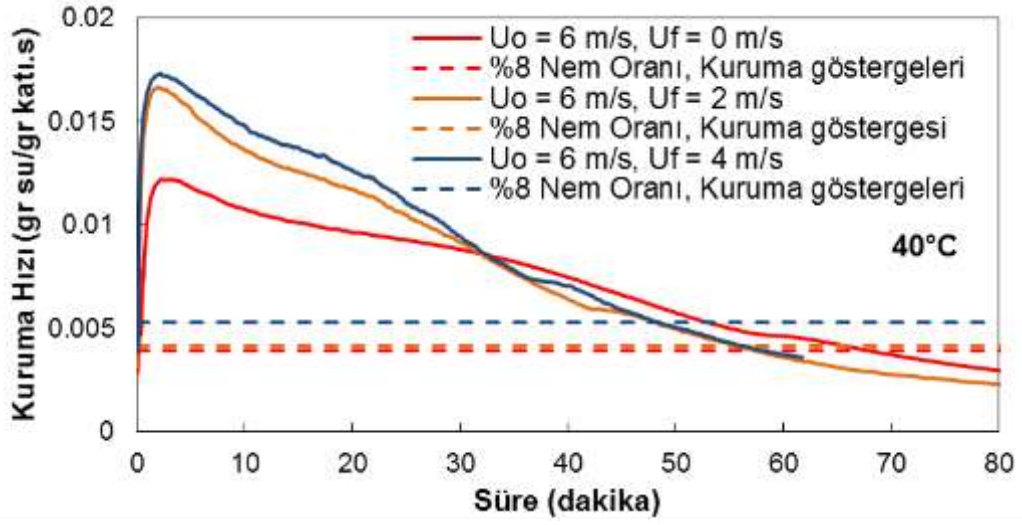
**Şekil 5.28**'de akışkanlaşma hızının kuruma eğrilerine, **Şekil 5.29**'da ise kuruma hızına olan etkisi gösterilmektedir. Akışkanlaşma hızının etkisi 3 ayrı giriş hava sıcaklığı ile yapılan deneylerde taşkınlaşma hızı 6 m/s olarak sabit tutularak incelenmiştir. Giriş hava sıcaklığı fark etmeksizin, akışkanlaşma havasının sisteme beslenmesiyle kuruma hızının arttığı ve kuruma süresinin ciddi bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu da kurumanın taşkın-akışkan yataklarda taşkın yataklara kıyasla daha hızlı olduğunu göstermektedir. Bu incelemede dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta akışkanlaşma hava hızının artması ile sisteme beslenen hava miktarının artmasıdır. Sisteme beslenen hava miktarının artması ile kuruma hızının artması beklenen bir durumdur. Aslında taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava hızlarının etkileri incelenirken sisteme beslenen toplam hava miktarının aynı tutularak karşılaştırmaların yapılması daha sağlıklıdır. **Şekil 5.30** ve **Şekil 5.31**'de karşılaştırmalar sisteme beslenen toplam hava miktarı sabit kalacak şekilde taşkınlaşma ve akışkanlaşma hava hızları değiştirilerek yapılmıştır. Bu grafikler incelendiğinde, kurumanın en yoğun olduğu ilk 20 dakikalık sürede, taşkınlaşma havasının en yüksek olduğu koşulda kuruma hızının en yüksek olduğu görülmektedir. Kurutma deneyleri öncesinde yapılan hidrodinamik deneylerde elde edilen minimum kararlı taşkınlaşma hızları göz önüne alındığında, bu taşkınlaşma hızının jet taşkınlaşma hızına yakın olduğu hesaplanmaktadır. Bu da jet taşkınlaşma rejimine yaklaşıldıkça kurumanın daha etkili olduğunu göstermektedir.

Bütün yapılan deneyler ve bu deneylerde kaydedilen kuruma süreleri **Çizelge 5.4**'te özetlenmektedir. Aynı zamanda kuruma süresinin operasyon koşullarına göre değişimi **Şekil 5.32**'da gösterilmektedir. Taşkınlaşma hava hızı ve giriş hava sıcaklığı arttıkça kuruma süresi belirgin bir şekilde azalmaktadır. Akışkanlaşma hava hızının artmasıyla da kuruma süreleri azalmıştır. Ancak akışkanlaşma hava hızının etkisi çok daha azdır. En hızlı kuruma, giriş hava sıcaklığı 90°C iken görülmüştür. Toplam hava debisi sabit tutularak, akışkanlaşma havasının etkisi incelendiğinde, akışkanlaşma havasının arttırılmasıyla kurutma sürelerinde belirgin bir azalma elde edilmemiştir.

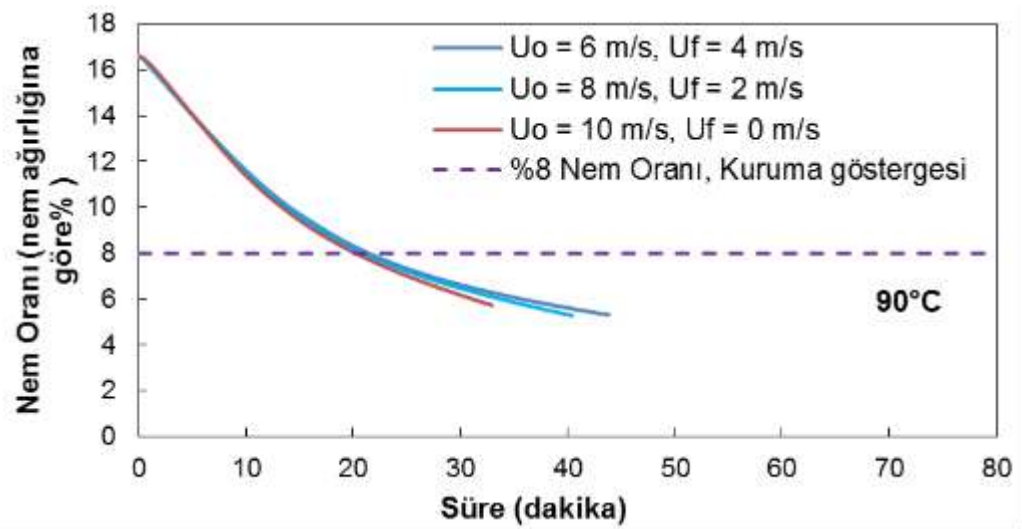
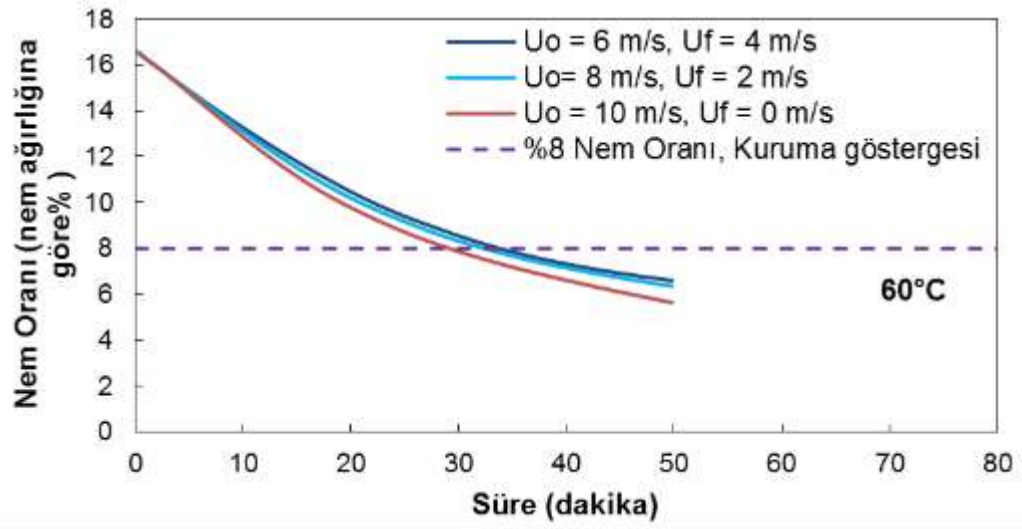
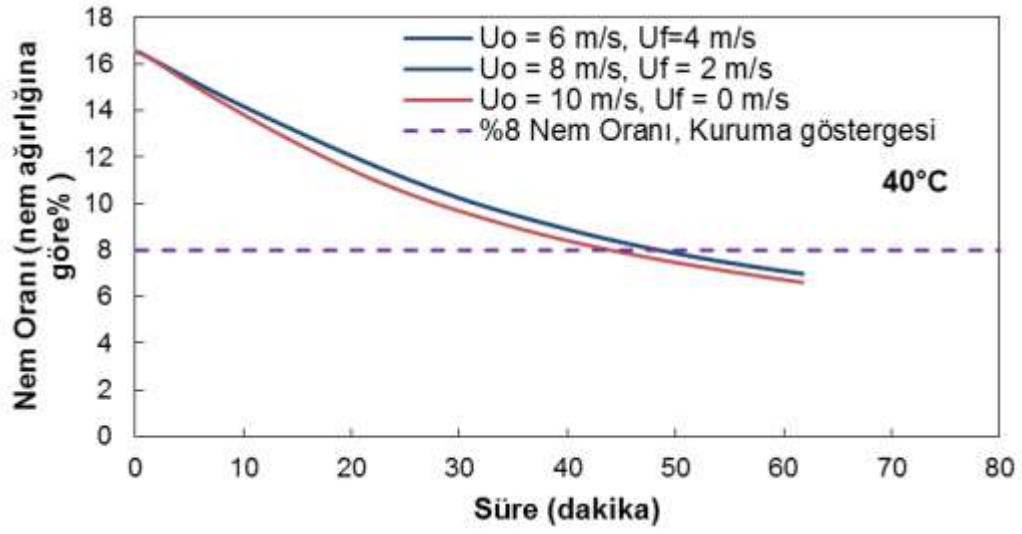


Şekil 5.28. Akışkanlaşma hava hızının kuruma eğrilerine olan etkisi ( $U_o = 6 \text{ m/s}$ )

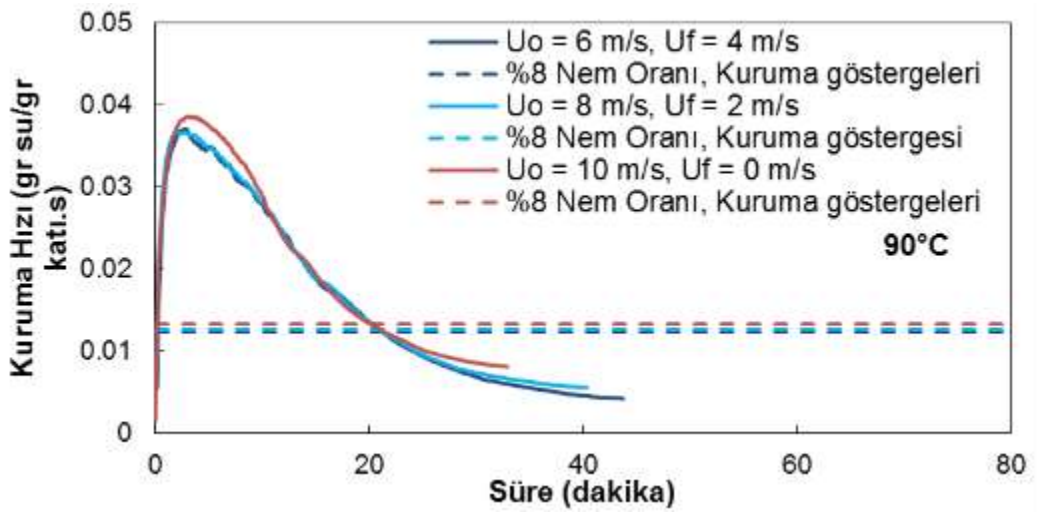
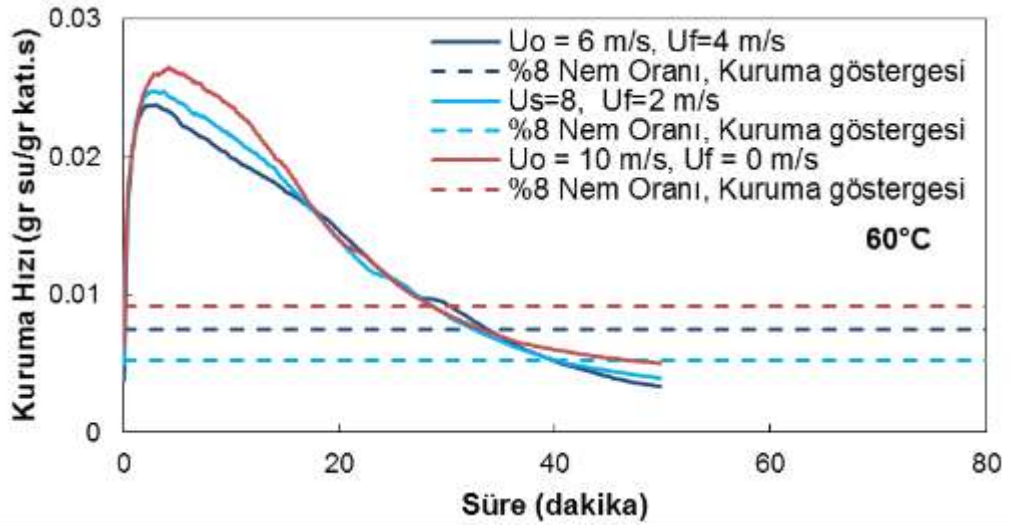
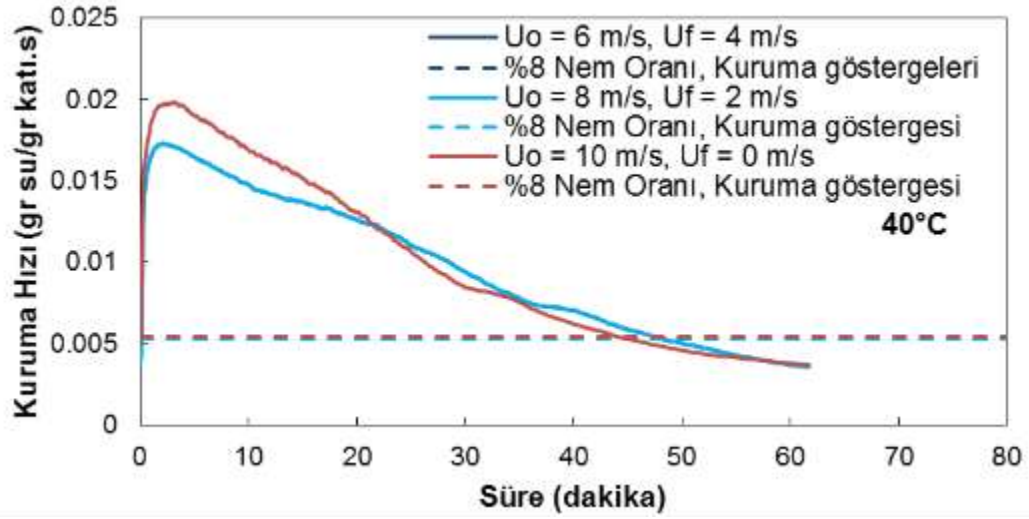




Şekil 5.29. Akışkanlaşma hava hızının kuruma hızına etkisi ( $U_o = 6 \text{ m/s}$ )

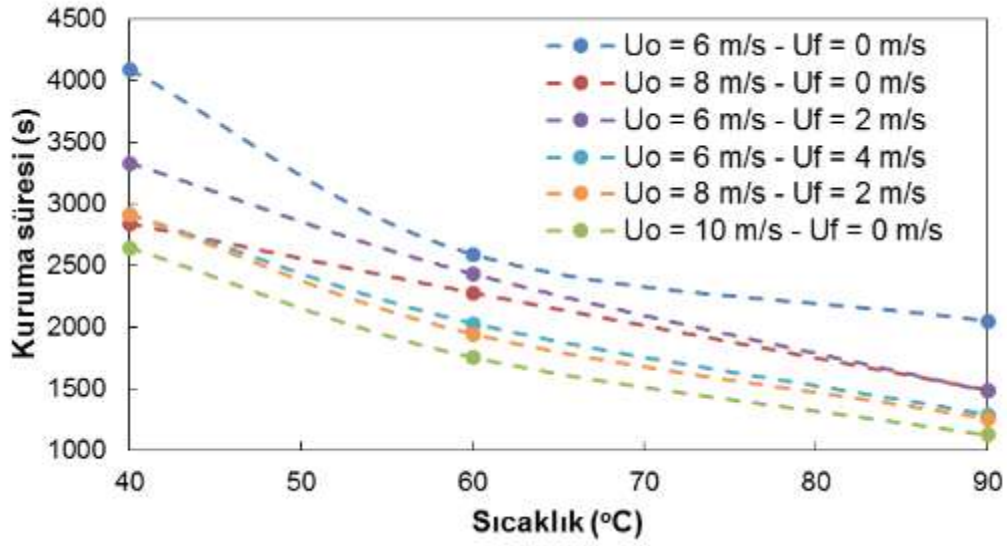


**Şekil 5.30.** Sisteme beslenen toplam hava miktarı sabit tutularak akışkanlaşma ve taşkınlaşma hava hızlarının kuruma eğrilerine olan etkisinin incelenmesi



**Şekil 5.31.** Sisteme beslenen toplam hava miktarı sabit tutularak akışkanlaşma ve taşkınlaşma hava hızlarının kuruma hızına olan etkisinin incelenmesi





**Şekil 5.32.** Kuruma süresinin operasyon koşullarına göre değişimi

### 5.2.1 Kurutma Enerji İhtiyacı

Bir kurutma işleminin endüstriyel açıdan en önemli kısıtı kurutma enerji ihtiyacıdır. Kurutma işlemi için kullanılan reaktörün kurutma enerji ihtiyacını minimuma indirecek koşullarda çalıştırılması önem taşımaktadır. Kurutma enerji ihtiyacını belirleyen en önemli faktörler **kurutma havası debisi** ve **sıcaklığı** ve **kurutma zamanıdır**. Bu üç faktörün arasındaki yatak hidrodinamiği, ısı ve kütle transferine dayanan karmaşık ilişki kurutma enerji ihtiyacını belirlemektedir. Bu kapsamda proje kapsamında gerçekleştirilen tüm deney koşulları için kurutma enerji ihtiyacı hesaplanmıştır.

Kurutma enerji ihtiyacını hesaplamak için temel olarak havayı kurutma işlemi süresince ilgili kurutma sıcaklığında tutmak için gerekli enerji göz önüne alınmıştır. Hava debisini sağlayan kompresör enerji ihtiyacı havayı ısıtmak için gerekli olan enerji ihtiyacına göre çok düşük olması nedeniyle dikkate alınmamıştır. Bu kapsamda bir kurutma işlemi süresince, kurutma havasına (akışkanlaşma ve taşkınlaşma havaları) verilen enerji miktarı aşağıdaki enerji aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır:

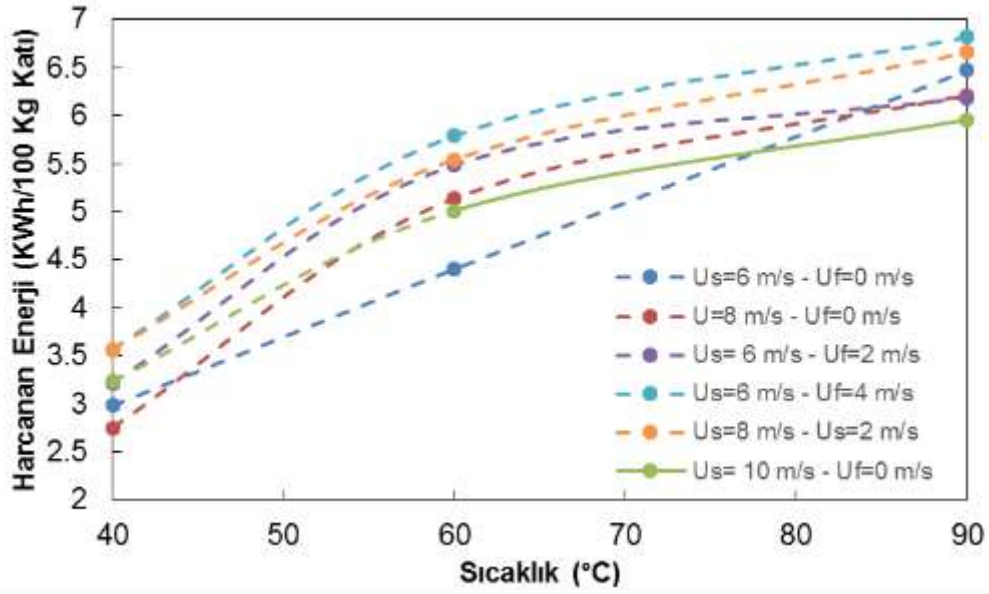
$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_k - T_{ortam}) (\Delta t) \quad (5.1)$$

Bu denklikte  $\dot{m}_g$  sisteme beslenen toplam hava kütle akış debisini,  $C_p$  (J/kg.°C) havanın özgül ısısını,  $T_k$  (°C) kurutma sıcaklığını (kurutucu giriş hava sıcaklığı),  $T_{ortam}$  ortam hava sıcaklığını,  $\Delta t$  ise toplam kuruma süresini göstermektedir. Hesaplanan enerji miktarları **Çizelge 5.4**'te sunulmuştur. Aynı zamanda enerji ihtiyacının farklı işletim koşullarına göre değişimi **Şekil**

5.33’de gösterilmektedir. **Şekil 5.32** ve **Şekil 5.33** beraber değerlendirildiğinde kurutma süresini en aza indiren 90°C kurutma sıcaklığının enerji ihtiyacı açısından tüm koşullar için en maaliyetli sıcaklık olduğu görülmektedir. Buna karşın 40°C kurutma sıcaklığı kurutma zamanı açısından bir avantaj sağlamamasına rağmen, enerji ihtiyacı açısından en uygun sıcaklık olarak görünmektedir. Toplam hava debisi sabit tutularak akışkanlaşma havasının etkisi incelendiğinde, test edilen tüm sıcaklıklarda akışkanlaşma havasının kullanılmadığı durumlar enerji ihtiyacının en düşük olduğu işletim koşulları olarak ortaya çıkmaktadır.

**Çizelge 5.4.** Kuruma süreleri ve enerji ihtiyaçları

Giriş hava sıcaklığı (°C)	Taşkınlaşma hava hızı, $U_o$ (m/s)	Akışkanlaşma hava hızı, $U_f$ (m/s)	Kuruma süresi (dakika)	Q (kWh/ 100 kg katı)
40	6	0	68	2.98
60	6	0	43	4.40
90	6	0	34	6.47
40	8	0	47	2.74
60	8	0	38	5.13
90	8	0	25	6.21
40	10	0	44	3.23
60	10	0	29	5.01
90	10	0	19	5.96
40	6	2	56	3.22
60	6	2	41	5.48
90	6	2	25	6.18
40	6	4	49	3.56
60	6	4	34	5.79
90	6	4	21	6.82
40	8	2	49	3.56
60	8	2	32	5.54
90	8	2	21	6.66



Şekil 5.33. Enerji ihtiyacının işletim koşullarına göre değişimi

### 5.3 Sonuçlar

Bu bölümde akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucunun tasarımı süreci tüm detaylarıyla sunulmuş, üretilen kurutucuyla gerçekleştirilen deney sonuçları tartışılmıştır. Deneyler üç ayrı sıcaklıkta (40°C, 60°C ve 90°C), farklı taşkınlaşma ve akışkanlaşma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Tüm çalışma koşullarında yatak içerisinde homojene yakın bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Yatak içi eksenel sıcaklık dağılımlarına bakıldığında sıcaklığın, akış borusuna yakın kısımda yatak yüksekliği boyunca belirgin miktarda değişmediği, radyal değişimlere bakıldığında ise, konik duvara yaklaştıkça sıcaklığın son derece az miktarda arttığı görülmektedir. Bu sonuç, taşkın-akışkan yatak sisteminin önemli bir avantajını ortaya koymaktadır. Yatak içerisinde homojen bir kurutma ortamı sağlanmıştır.
- Giriş sıcaklığının artırılması tüm işletim koşullarında kuruma süresini beklenildiği gibi azaltmıştır. En düşük kuruma süreleri 90°C'de elde edilmiştir.
- Yatak hem taşkın yatak ve hem de taşkın-akışkan yatak olarak çalıştırıldığında gaz giriş sıcaklığı fark etmeksizin, taşkınlaşma hava hızı artırıldığında kuruma süresinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Kurumanın büyük bir kısmının gerçekleştiği deneylerin ilk 20-30 dakikasında taşkınlaşma hızı arttıkça kuruma hızının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle jet rejime yakın işletim koşullarında en düşük kuruma süreleri elde edilmiştir.

- Sabit taşkınlaşma hızında, akışkanlaşma hızının artırılması kuruma hızını arttırmış, kuruma süresini düşürmüştür.
- Toplam hava debisi sabit tutularak, akışkanlaşma havasının etkisi incelendiğinde, akışkanlaşma havasının artırılmasıyla kurutma sürelerinde belirgin bir azalma elde edilmemiştir.
- Kurutma enerji ihtiyacını belirleyen en önemli faktörler olan kurutma havası debisi ve sıcaklığı ve kurutma zamanı bir arada ele alındığında, 40°C'de en düşük enerji gereksinimi değerleri elde edilmiştir. Kurutma süresini en aza indiren 90°C kurutma sıcaklığının enerji ihtiyacı açısından tüm koşullar için en maliyetli sıcaklık olduğu görülmüştür. Toplam hava debisi sabit tutularak akışkanlaşma havasının etkisi incelendiğinde, test edilen tüm sıcaklıklarda akışkanlaşma havasının kullanılmadığı durumlar enerji ihtiyacının en düşük olduğu işletim koşulları olarak ortaya çıkmıştır. Tüm deney koşulları içerisinde minimum enerji gereksinimi 8 m/s taşkınlaşma hava hızında **2.74 kWh/100 kg** olarak elde edilmiştir.

## 6 GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu rapor mikron boyutundaki nem oranı yüksek zeolit parçacıkların en verimli ve ekonomik biçimde kurutulmasını sağlamak için bir akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu sistemi tasarlamak ve üretmek için yürütülen çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır. Proje çalışması akış borulu taşkın ve taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilen kapsamlı gaz-katı akış dinamiği (hidrodinamik), ısı transferi ve kurutma deneylerinin sonuçlarını kapsamaktadır.

Proje çalışması soğuk yatak hidrodinamik çalışmalarıyla başlamış, gaz-katı akış dinamiği açısından en uygun tasarım ve işletim koşulları bulunmuştur. Elde edilen bu koşullar için akış borulu bir taşkın-akışkan yatak kurutucu tasarlanıp, imal edilmiş ve kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. **Bu çalışma kapsamı itibarıyla literatürde bulunan akış borulu taşkın-akışkan yataklar konusundaki en kapsamlı çalışmalardan biridir.** Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

### ***Hidrodinamik Çalışmaların Sonuçları***

Hidrodinamik çalışmalar yatak basınç düşüm ölçümleri, minimum taşkınlaşma hızlarının belirlenmesi, parçacık dinamiği ve yatak ölü bölgelerinin hızlı kamera yardımıyla belirlenmesi ve bir optik sonda yardımıyla parçacık konsantrasyonu ölçümlerini kapsamaktadır.

- Zeolit parçacıkları akış borusu kullanılmayan 30 ve 45 dereceli konik taşkın yataklarda taşkınlaştırılamamıştır. Bu sonuçlar mikronize boyuttaki zeolit parçacıklarının taşkınlaştırılabilmesi için akış borusunun gerekli olduğunu göstermiştir. Akış borusunun kullanımı kararlı bir taşkınlaşmanın oluşumuna izin vermiştir. Ayrıca yatağın duvar kısmında oluşan ölü bölgede de kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir.
- 3 farklı çapta (13, 18 ve 23 mm) ve 4 farklı boyda (60, 80, 100, 120 mm) imal edilen akış boruları ile 30 derecelik konik açığa sahip yarım ve tam taşkın yatakta yapılan deneylerde, akış borulu yarım taşkın yatak deney sonuçlarının tam yatak deney sonuçları ile büyük oranda birbiriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir.
- Basınç düşümü ölçümleri ve minimum kararlı akışkanlaşma hızının akış borusu boyu ile arttığı ancak akış borusu çapı ile çok değişmediği görülmüştür.
- Yarım ve tam yataklarda minimum taşkınlaşma ve minimum kararlı taşkınlaşma gaz hızlarının yatak yüksekliği arttıkça arttığı, ancak bu hızlarla ilgili akış borusunun çapına bağlı tutarlı ve belirgin bir değişim olmadığı belirlenmiştir.

- Kaldırma yüksekliği genel olarak yatak basınç düşümü değerlerinde ve taşkınlaşma hızlarında oldukça belirgin bir artışa sebep olmuştur. Ayrıca kaldırma yüksekliğinin 30 mm'nin üzerine çıktığı koşullarda taşkın bölgenin akış borusu dışına taşıdığı gözlemlenmiştir. Bu durum uygulama açısından elverişsiz bulunmuş ve 30 mm'lik kaldırma yüksekliğinin tasarım açısından en uygun değer olduğu saptanmıştır.
- 30 ve 60 derecelik akış borulu taşkın-akışkan yataklarda gerçekleştirilen basınç düşümü, minimum kararlı taşkınlaşma hızı ve hızlı kamera ölçümleri, aynı yatak malzemesi ağırlığında 30 ve 60 derecelik yatakların birbirlerine yakın minimum kararlı taşkınlaşma hızına sahip olduklarını göstermiştir. Dolayısıyla iki açıda için kullanılabilecek olan taşkınlaşma ve akışkanlaşma gaz hızları birbirlerine yakındır. 30 derecelik yatakda, aynı yatak malzemesi ağırlığı kullanıldığı durumda, 60 derecelik yatağa göre kararlı bölge yatak basınç düşümü biraz daha fazladır.
- Akışkanlaşma hızının artırılması, minimum kararlı taşkınlaşma hızını azaltmaktadır. Buna karşın yatak basınç düşümü artmaktadır. Dolayısıyla yatakdaki ölü bölge oluşumunu engelleyecek en düşük akışkanlaşma hızının kullanılması önerilmektedir. Bu hız 4-5 m/s aralığındadır.
- 30 ve 60 derecelik açılı yataklar aynı malzeme ağırlığında gaz hızları ve basınç düşümü açısından birbirlerine yakın performans göstermektedir. Buna karşın hızlı kamera ölçümleri ve deneyler sırasında yapılan gözlemler, 30 derecelik açıda hiç bir koşulda ölü bölge oluşmadığını, parçacık hareketinin özellikle halka bölgesinde çok daha hızlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu tasarımı için 30 derecelik konik açının kullanılmasına karar verilmiştir.
- Akışkanlaşma ve taşkınlaşma hızının akış borusu içindeki parçacık konsantrasyonuna ciddi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Halka bölgesinde ise, akışkanlaşma ve taşkınlaşma hızının artmasıyla parçacık konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Akışkanlaşma gazının verilmesiyle duvar kenarlarında oluşan ölü bölgelerin ortadan kalktığı ve daha homojen bir radyal parçacık dağılımının olduğu belirlenmiştir. Akışkanlaşma hızının çok yüksek olduğu durumlarda ise, duvar kenarında parçacıkların çok az olduğu hava boşluğu bölgelerinin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla akışkanlaşma hızının değerinin dikkatli bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir.

### ***Yüzey-Yatak Isı Transferi Çalışmaları Sonuçları***

Yüzey-yatak ısı transferi çalışmaları kapsamında halka ve taşkın bölgelerinde, yatak içerisine daldırılmış yüzey ile yatak arasındaki ısı transferi katsayılarını belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir.

- Deneylerden elde edilen sonuçlara göre halka bölgesinde **100 ile 250 W/m<sup>2</sup>K** arasında değişen ısı transferi katsayıları elde edilmiştir. Bu değerler literatürdeki değerlerle uyum göstermektedir (Chatterjee v.d., 1983). Taşkınlaşma havasının belli bir düzeyin üzerine çıkarılması halka bölgesinde ısı transferi katsayısını arttırmıştır. Akışkanlaşma havası ise jet bölgesine kadar ısı transferini arttırmış, jet bölgesinde ısı transferi katsayısında bir değişiklik gözlemlenmemiştir.
- Taşkın-akışkan yatak ısı transferinden genel olarak iki fiziksel mekanizma bulunmaktadır. Genel olarak hava hızının artırılması, parçacıkları hareketlendirip yüzey ile olan etkileşimlerini arttırdığı için ısı transferine pozitif etki yapmaktadır. Çok yüksek hava hızları ise yüzey etrafındaki parçacık konsantrasyonunu azalttığı için ısı transferini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla belirli bir hızda, yatak-yüzey ısı transferini bu iki fiziksel mekanizmanın göreceli ağırlıkları belirlemektedir.
- Taşkın bölgede akışkanlaşma hava hızından bağımsız olarak **180 W/m<sup>2</sup>K** civarında bir ısı transferi katsayısı mevcuttur.

### ***Kurutma Çalışmaları Sonuçları***

Hidrodinamik çalışmaların sonuçları kullanılarak en uygun tasarım ve işletim koşulları belirlenmiş ve akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu bu koşullara göre tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu kapsamda 30 derece konik açılı, 168 mm kolon çapı ve 285 mm konik kısım yüksekliğine sahip bir taşkın-akışkan yatak kurutucu imal edilmiştir. Akışkanlaşma havası için konik kısımda 1 mm çapında 440 delik açılmıştır. Akış borusu iç çapı – hidrodinamik çalışmaların sonuçlarına dayanarak – 23 mm olarak seçilmiştir. Kurutma deneyleri sonucunda edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Tüm çalışma koşullarında yatak içerisinde homojene yakın bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Yatak içi eksenel sıcaklık dağılımlarına bakıldığında sıcaklığın, akış borusuna yakın kısımda yatak yüksekliği boyunca belirgin miktarda değişmediği, radyal değişimlere bakıldığında ise, konik duvara yaklaştıkça sıcaklığın son derece az miktarda arttığı görülmektedir. Bu sonuç, taşkın-akışkan yatak sisteminin önemli bir

avantajını ortaya koymaktadır. Yatak içerisinde homojen bir kurutma ortamı sağlanmıştır.

- Giriş sıcaklığının artırılması tüm işletim koşullarında kuruma süresini beklenildiği gibi azaltmıştır. En düşük kuruma süreleri 90°C'de elde edilmiştir.
- Yatak hem taşkın yatak ve hem de taşkın-akışkan yatak olarak çalıştırıldığında gaz giriş sıcaklığı fark etmeksizin, taşkınlaşma hava hızı artırıldığında kuruma süresinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Kurumanın büyük bir kısmının gerçekleştiği deneylerin ilk 20-30 dakikasında taşkınlaşma hızı arttıkça kuruma hızının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle jet rejime yakın işletim koşullarında en düşük kuruma süreleri elde edilmiştir.
- Sabit taşkınlaşma hızında, akışkanlaşma hızının artırılması kuruma hızını arttırmış, kuruma süresini düşürmüştür.
- Toplam hava debisi sabit tutularak, akışkanlaşma havasının etkisi incelendiğinde, akışkanlaşma havasının artırılmasıyla kurutma sürelerinde belirgin bir azalma elde edilmemiştir.
- Kurutma enerji ihtiyacını belirleyen en önemli faktörler olan kurutma havası debisi ve sıcaklığı ve kurutma zamanı bir arada ele alındığında, 40°C'de en düşük enerji gereksinimi değerleri elde edilmiştir. Kurutma süresini en aza indiren 90°C kurutma sıcaklığının enerji ihtiyacı açısından tüm koşullar için en maliyetli sıcaklık olduğu görülmüştür. Toplam hava debisi sabit tutularak akışkanlaşma havasının etkisi incelendiğinde, test edilen tüm sıcaklıklarda akışkanlaşma havasının kullanılmadığı durumlar enerji ihtiyacının en düşük olduğu işletim koşulları olarak ortaya çıkmıştır. Enerji gereksinimi **2.74 kWh/100 kg – 6.82 kWh/100 kg** arasında değişmekle birlikte minimum değer (**2.74 kWh/100 kg**) 8 m/s taşkınlaşma hava hızında elde edilmiştir.
- Elde edilen sonuçlar, ekonomik değeri yüksek olan zeolit parçacıklarının kurutulması için taşkın ve taşkın-akışkan yatakların kurutucu teknolojisi olarak seçilebileceklerini ve endüstriyel boyutta verimli bir biçimde işletilebileceklerini göstermektedir.



## **Öneriler**

Çalışma kapsamında kurutma performansı tek bir yatak yüksekliği için (malzeme miktarı) incelenmiştir. Farklı yatak yüksekliklerinde kurutma deneylerinin yapılması planlanmaktadır. Ayrıca akış borusuyla ilgili geometrik parametrelerin (akış borusu yüksekliği, yatak girişinden yüksekliği) kurutma performansı üzerine etkilerinin incelenmesi de literatüre ciddi bir katkı sağlayacaktır.

Taşkın-akışkan yatak ısı transferi mekanizmasının tam anlamıyla belirlenmesi amacıyla daldırılmış yüzey etrafında parçacık konsantrasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemlerle bunu gerçekleştirmek çok zordur; bu konuda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri uygulanabilir.

Farklı tasarım ve işletim koşullarında elde edilen kurutma verileri, zeolit parçacıkları için bir kurutma modeli geliştirilmesinde kullanılabilir. Bu kurutma modeli kullanılarak endüstriyel boyutta taşkın-akışkan yatak kurutucular tasarlanabilir ve boyut büyütme (scale-up) çalışmaları gerçekleştirilebilir.

## 7 REFERANSLAR

- Altzibar, H., Lopez, G., Alvarez, S., José, M.J.S., Barona, A., Olazar, M. 2008. "A Draft-Tube Conical Spouted Bed for Drying Fine Particles", *Drying Technology*, 26, 308-314.
- Altzibar, H., Lopez, G., Aguado, R., Alvarez, S., San Jose, M.J., Olazar, M. 2009. "Hydrodynamics of Conical Spouted Beds Using Different Types of Internal Devices", *Chemical Engineering & Technology*, 32, 463-469.
- Altzibar, H., Lopez, G., Olazar, M., Bilbao, J. 2011. "Effect of Temperature on Fine Particle Drying in a Draft-Tube Conical Spouted Bed", *Chemical Engineering and Technology*, 34, 1130-1135.
- Arsenijevic, Z.L., Grbavcic, Z.B., Garic-Grulovic, R.V. 2004. "Drying of Suspensions in the Draft Tube Spouted Bed", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82, 450-464.
- Basmacıoğlu, H., Ergül, M. 2003. "Yemlerde bulunan toksinler ve kontrol yolları", *Hayvansal Üretim*, 44, 9-17.
- Chatterjee, A., Adusumilli, R.S.S., Deshmukh, A.V. 1983. "Wall-to-Bed Heat Transfer Characteristics of Spout-Fluid Beds", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61, 390-397.
- Chatterjee, A. 1970. "Spout Fluid Bed Technique", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 9 (1970) 340-341.
- Chandnani, P.P. 1984. *Gas Spouting of Fine Particles*, Yüksek Lisans Tezi, The University of British Columbia, Vancouver, Kanada.
- Cunha, R.L., Maialle, K.G., Menegalli, F.C. 2000. "Evaluation of the Drying Process in Spouted Bed and Spout Fluidized Bed of Xanthan Gum: Focus on Product Quality", *Powder Technology*, 107, 234-242.
- Cunha, R.L., Cruz, A.G., Menegalli, F.C. 2006. "Effects of Operating Conditions on the Quality Of Mango Pulp Dried in a Spout Fluidized Bed", *Drying Technology*, 24, 423-432.
- Egrikiliç, D. 2009. Yeme eklenerek kullanılan zeolit (Klinoptilolit)'in, *Aeromonas Hydrophila* ile enfekte edilmiş Tilapia (*Oreochromis niloticus*)'ların kan parametreleri üzerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.
- Eng, J.H., Svrcek, Y.W., Behie, L.A. 1989. "Dynamic Modeling of a Spouted Bed Reactor with a Draft Tube", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 28, 1778-1785.
- Epstein, N., Grace, J.R. 2011. *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*, (1. Basım)., Cambridge: Cambridge University Press.
- Evin, D., Gül, H., Tanyıldızı, V. 2008. "Grain Drying in a Paraboloid-Based Spouted Bed with and without Draft Tube", *Drying Technology*, 26, 1577-1583.

- Freitas, L.A.P., Freire, J.T. 2001. "Gas-to-Particle Heat Transfer in The Draft Tube of a Spouted Bed", *Drying Technology*, 19, 1065-1082.
- Geankoplis, C.J. 1993. *Transport Processes and Unit Operations*, 3. Basım, Prentice-Hall, Inc., U.S.A.
- Geldart, D. 1973. "Types of gas fluidization", *Powder Technology*, 7, 285-292.
- Güvenir, Ö. 2005. *Synthesis and characterization of clinoptilolite*, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye.
- He, Y.L. 1990. *Spouted Bed and Spout-Fluid Bed Hydrodynamics in a 0.91 m Diameter Vessel*, Yüksek Lisans Tezi, The University of British Columbia, Vancouver, Kanada.
- He, Y.L., Lim, C.J., Grace, J.R. 1992. "Spouted bed and Spout-Fluid Bed Behavior in a Column of diameter 0.91 m", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 848-857.
- Inglezakis, V.J., Pouloupoulos, S.G. 2006. *Adsorption, Ion Exchange and Catalysis, Design of Operations and Environmental Applications*, Elsevier The Netherlands.
- Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M. 2003. "Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube Containing a Small Amount of Finer Particles", *Powder Technology*, 131, 56-65.
- Ishikura T., Nagashima H., Ide M. 2011. "Flow Regimes And Vertical Solids Conveying in a Spout-Fluid Bed With A Draft Tube" *Can. J. Chem. Eng.*, 89 (4), 264-273.
- Kfuri C. R., Freitas L. A. P. 2007. "A Comparative Study of Spouted and Spout-Fluid Beds for Tablet Coating." *Drying Technology: An International Journal*, 23(12), 2369-2386.
- Kunii, D., Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering*, Butterworth-Heinemann. E.U.A.
- Law, C.L., Mujumdar, A.S. 2007. *Handbook of Industrial Drying*, (3. Basım), Boca Raton: CRC Press.
- Macchi, A., Bi, H.T., Legros, R., Chaouki, J. 1999. "An Investigation of Heat Transfer from a Vertical Tube in a Spouted Bed", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77 (1), 45-53.
- Makibar, J., Fernandez-Akarregi, A.R., Díaz, L., Lopez, G., Olazar, M. 2012. "Pilot Scale Conical Spouted Bed Pyrolysis Reactor: Draft Tube Selection and Hydrodynamic Performance", *Powder Technology*, 219, 49-58.
- Makibar, J., Fernandez-Akarregi, A.R., Alava, I., Cueva, F., Lopez, G., Olazar, M. 2011. "Investigations on Heat Transfer and Hydrodynamics under Pyrolysis Conditions of a Pilot-Plant Draft Tube Conical Spouted Bed Reactor", *Chemical Engineering and Processing*, 50, 790-798.
- Marmo, L. 2007. "Low Temperature Drying of Pomace in Spout and Spout-Fluid Beds", *Journal of Food Engineering*, 79, 1179-1190.

- Marmo L. 2006. "Low Temperature Drying of Pomace in Spout and Spout-Fluid Bed". *Journal of Food Engineering*, 79 (04), 1179-1190.
- Mumpton, F.A. 1999. "La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry", A.B.D: *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 96, 3463-3470.
- Muir J. R., Berrutti F. And Behie L. A. 1989. "Solid Circulation in Spouted and Spout-Fluid Beds with Draft Tube". *Chem Eng. Comm.*, 88 (8), 153-171.
- Nagaraju, V.D., Sridhar, B.S. 2014. "Hydrodynamics and Heat Transfer Characteristics of Draft Tube Spouted Bed Roasting of Groundnuts", *International Journal of Scientific and Technology*, 3 (7), 178-186.
- Nagashima, H., Ishikura, T., Ide, M. 2009. "Effect of the Tube Shape on Gas and Particle Flow in Spouted Beds with a Porous Draft Tube", *The Canadian Journal of Chemical*, 87 (2009) 228-236.
- Nagashima, H., Ishikura, T., Ide, M. 2011. "Flow Regimes and Vertical Solids Conveying in a Spout-Fluid Bed with a Draft Tube", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89, 264-273.
- Neto, J.L.V., Duarte, C.R., Murata, V.V., Barrozo, M.A.S. 2008. "Effect of a Draft Tube on the Fluid Dynamics of a Spouted Bed: Experimental and CFD Studies", *Drying Technology*, 26, 299-307.
- Niebuhr, D. 2005. Sympatec GmbH. <http://sympatec.com/images/Software/QpGallery01.pdf>. Son erişim tarihi: 8/21/2015
- Olazar, M., Lopez, G., Altzibar, H., Bilbao, J. 2011. "Modelling Batch Drying of Sand in a Draft-Tube Conical Spouted Bed", *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 2054-2062.
- Osorio-Reville, G., Elias-Serrano, R., Gallardo-Velazquez, T. 2004a. "Simultaneous Drying and Cleaning of Guava Seeds in a Spout-Fluid Bed with Draft Tube", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82, 148-153.
- Osorio-Revilla, G., Elias-Serrano, R., Gallardo-Velazquez, T. 2004b. "Drying of Liquid Feedstocks in a Spout-Fluid-Bed with Draft-Tube Submerged in Inert Solids: Hydrodynamics and Drying Performance", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82, 142-147.
- Peraica, M., Domijan, A.M., Jurjevic, Z., Cvjetkovic, B. 2002. "Prevention of exposure to mycotoxins from food and feed", *Arh Hig Rada Toksikol*, 53, 229-237.
- Pianarosa D. L. 1996. *Hydrodynamics Studies of Spouted and Spout-Fluid Bed*. Yüksek Lisans Tezi, Univ. of British Columbia, Vancouver, BC.
- Pianarosa, D.L., Freiatas, L.A.P., Lim, C.J., Grace, J.R. 2000. "Voidage and Particle Velocity Profiles in a Spout-Fluid Bed, *Can. J. Chem. Eng.*, 78, 132-142.

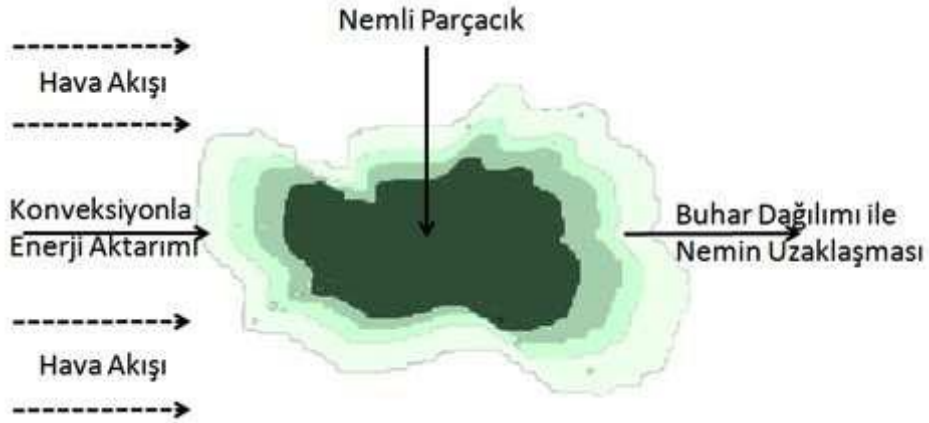
- Povrenovic, D.S., Dimitrijevic-Brankovic, S. 2002. "Drying of Biological Materials in a Spout-Fluid Bed with a Draft Tube", *Hemijska Industrija*, 56, 141-146.
- Povrenovic, D.S., Grbavcic, Z.B., Vukovic, D.V. 1990. "Drying of Suspensions in a Spout-Fluid Bed", *Prehrambeno-tehnol.biotehnol. Rev.*, 28, 141-144.
- Sabuncuoğlu, S.A., Baydar, T., Giray, B., Şahin, G. 2008. "Mikotoksinler: Toksik etkileri, degradasyonları, oluşumlarının önlenmesi ve zararlı etkilerinin azaltılması", *Hacettepe Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 28, 63-92.
- Saldarriaga, J.F., Grace, J., Lim, C.J., Wang, Z., Xu, N., Atxutegi, A., Aguado, R., Olazar, M. 2015. "Bed-to-surface heat transfer in conical spouted beds of biomass-sand mixtures", *Powder Technology*, 283, 447-454.
- San Jose, M.J., Alvarez, S., Salazar, A.O., Olazar, M., Bilbao, J. 2007. "Operating Conditions of Conical Spouted Beds with a Draft Tube. Effect of the Diameter of the Draft Tube and of the Height of Entrainment Zone", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 2877-2884.
- San José, M.J., Alvarez, S., Peñas, F.J., López, L.B. 2012. "Modelling of Analysis of Influence Parameters on Cycle Time in a Novel Conical Spouted Bed Dryer with a Draft Tube", *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 3, 1506-1511.
- Sari, S., Polat, A., Zaglanmis, D., Kulah, G., and Koksai, M., 2011. "Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with High Density Particles", *International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidized Bed Technology*, CFB-10, Oregon, USA.
- Sari, S., Kulah, G., Koksai, M. 2012. "Characterization of gas-solid flow in conical spouted beds operating with heavy particles", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, 132-139.
- Shuhama, I.K., Aguiar, M.L., Oliveira, W.P., Freitas, L.A.P. 2003. "Experimental Production of Annatto Powders in Spouted Bed Dryer", *Journal of Food Engineering*, 59, 93-97.
- Sutanto. W. 1983. *Hydrodynamics of spout-fluid beds*, Yüksek Lisans Tezi, Univ. of British Columbia, Vancouver, Kanada.
- Sutanto, W., Epstein, N., Grace, J. R. 1985. "Hydrodynamics of spout-fluid beds". *Powder Technology*, 44, 205–212.
- Stocker, R.K., Eng, J.H., Svrcek, W.Y., Behie, L.A. 1989. "UltrapYROLYSIS of Propane in a Spouted-Bed Reactor with a Draft Tube", *AIChE Journal*, 35, 1617-1624.
- Treybal, R.E. 1981. *Mass-transfer operations*, 3. Basım., McGraw-Hill, Inc., Japonya, Tokyo.
- Tufan, Ö.E. 2002. *Ion exchange properties of Gördes clinoptilolite*, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye.
- Vukovic, D.V., Hadzismajlovic, D.E., Grbavcic, Z.B. 1984. "Flow Regimes for Spout Fluidized Beds", *Can. J. Chem. Eng.*, 62, 825-829.
- Xiao R., Zhang M., Jin B., Liu X. 2002. "Solids Circulation Flux and Gas Bypassing in a Pressurized Spout-fluid Bed with a Draft Tube" *Can. J. Chem. Eng.*, 80 (10), 800-808.

- Xu, J., J. Tang, W. Wei and X. Bao. 2009. "Minimum Spouting Velocity in a Spout-Fluid Bed with a Draft Tube," *Can. J. Chem. Eng.*, 87(2), 274–278.
- Xu J., Gong L., Bao X., Wei W. 2010. "Hydrodynamics of a Spout-Fluid Bed with an Enlarged Column for Fine Particles". *Engineering Conferences International, The 13th International Conference on Fluidization - New Paradigm in Fluidization Engineering*.
- Yetgin, S. 2006. Investigation of fuel oxygenate adsorption of clinoptilolite rich natural zeolite, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Yurtoğlu, A. 2007. Türk Klinoptilolitlerinin Minerolojik Özelliklerinin İyon Değişimi Yöntemiyle Amonyum Giderim Kapasitesi Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Zabrodsky, S.S., Mikhailik, V.D. 1974. The Heat Exchange of the Spouting Bed with a Submerged Heating Surface, Intensification of Transfer of Heat and Mass in Drying and Thermal Processes, 130-137.
- Zhao, X. L., Yao, Q., Li, S.-Q. 2006. "Effects of Draft Tubes on Particle Velocity Profiles in Spouted Beds", *Chemical Engineering & Technology*, 29, 875-881.
- Zhang, J. Y., Tang, F. X. 2006. "Prediction of flow regimes in spout-fluidized beds". *China Particuology*, 4, 189–193.
- Zhong, W. Q., Li, Q. J., Zhang, M. Y., Jin, B. S., Xiao, R., Huang, Y. J., Shi, A. Y. 2008. "Spout characteristics of a cylindrical spout-fluid bed with elevated pressure". *Chem. Eng. J.*, 139, 42–47.
- Zhu, J., Tang, J., Wei, W., Bao, X. 2009. "Minimum Spouting Velocity in a Spout-Fluid Bed with a Draft Tube", *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 274-278.
- Zielinska, M., Markowski, M. 2007. "Drying Behavior of Carrots Dried in A Spout-Fluidized Bed Dryer", *Drying Technology*, 25, 261-270.
- Zielinska, M., Markowski, M. 2010. "Air Drying Characteristics and Moisture Diffusivity of Carrots", *Chemical Engineering And Processing*, 49, 212-218.

## EK-A

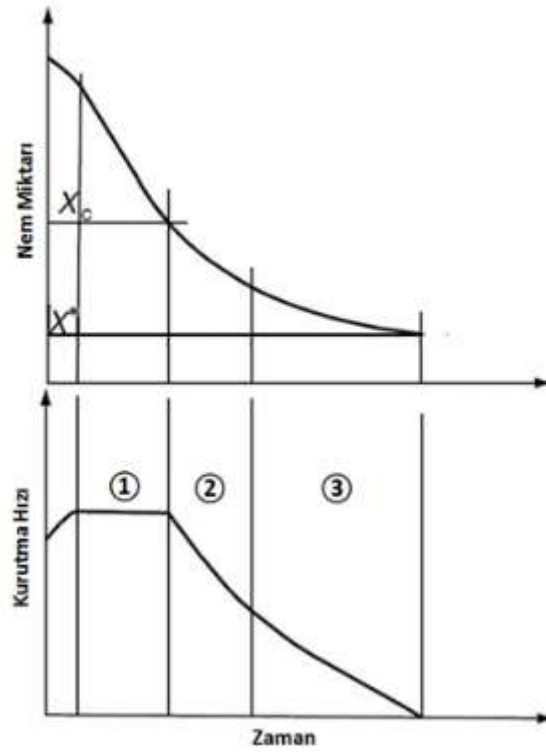
### Kuruma Hızı Hesapları için Kullanılan Model

Katı maddelerin taşkın-akışkan yataklı kurutma yöntemi ile kurutulması, eş zamanlı gerçekleştirilen ısı ve kütle transferi ile açıklanabilmektedir. Bu tip bir kurutucuda uygulanan kurutma işlemi, konveksiyonel ısıtma mekanizması sayesinde gerçekleştirilir. Bu sayede, **Şekil A.1**'de görüldüğü üzere sıcaklık farkının bir neticesi olarak kurutucu havadan nemli parçacığa doğru bir ısı transferi gerçekleşmekte ve aynı anda da nemli parçacıktan kurutucu havaya kütle (su buharı) transferi gerçekleşmektedir. Gerçekleşen kuruma, temel olarak kurutucu gazın nem miktarına, akış hızına ve sıcaklığına bağlıdır.



**Şekil A.1.** Taşkın-akışkan yataklı kurutucuda aktarım mekanizmaları

Nemli bir katı madde kurutma işlemine tabi tutulduğunda, parçacığın etrafını çeviren kurutucu gazdan gelen ısı aktarımı parçacığın yüzeyindeki nemin oluşturduğu ince bir film içerisinde suyun buharlaşmasına sebep olur. Bu sırada parçacığının iç kısmında yer alan nem de buharlaşma ile aynı hızda yüzeye doğru ilerler. Bu durum aşağıdaki şekilde 1 numaralı bölge ile gösterilen sabit kurutma hızı sürecinin sonuna kadar aynı şekilde devam eder (Law ve Mujumdar, 2007).



**Şekil A.2.** Konvektif kurutmada elde edilen karakteristik kuruma eğrileri

Parçacıkların iç gözeneklerinden yüzeye doğru gerçekleşen nem dağılım hızı yüzeyde gerçekleşen buharlaşma hızını karşılayamamaya başladığı takdirde yüzeyde yer alan film tabakası kalınlığında önemli bir düşüş olur. Bu noktadan sonra kurutma devam ettirildiğinde yatak malzemesinin nem içeriği kritik bir değere gelir ( $X_c$ ) ve daha sonra yüzeyde bazı kuru noktalar oluşmaya başlar. Şekilde yer alan 2 numaralı bölge sonuna kadar bu kuru noktalar gittikçe büyüyerek tüm yüzeyi kaplar ve dolayısıyla yüzey filmi tamamen gözden kaybolur. Bu bölgeden itibaren düşen kuruma hızı süreci başlamış olur. 3 numaralı bölgeye ulaşıldığında ise kurutma tamamıyla nem derişimi gradyanına bağlı olarak, iç kısımlardan yüzeye doğru olan nem dağılım mekanizması sayesinde gerçekleşir. Bu bölge boyunca kuruma hızı gittikçe düşer ve denge nem miktarına ( $X^*$ ) ulaşıldığı anda kurutma işlemi sona erer (Law ve Mujumdar, 2007; Treybal, 1981; Geankoplis, 1993).

Bu çalışmada kuruma hızının hesaplanmasında, taşkın-akışkan yatak, **Şekil A.3'**ten görülebileceği gibi kesikli işletilen, sabit basınçta çalışan homojen bir sistem olarak alınmıştır. Sisteme giren ve çıkan hava girişleri göz önüne alındığında sistem içindeki nem oranının zamana bağlı değişimi aşağıdaki denklik kullanılarak hesaplanabilir:



$$-M_s \frac{d\bar{X}}{dt} = \dot{M}_g (Y_{out} - Y_{in}) \quad (A1)$$

Bu denklikte,  $M_s$  yataktaki nemli malzemenin kuru kütleini (kg),  $X$  yatak içerisinde homojen olan nem içeriğini (kg/kg),  $\dot{M}_g$  kurutucu havanın kuru kütle akış hızını (kg/s),  $Y_{out}$  ve  $Y_{in}$  çıkış ve giriş havasının nemliliğini (kg su buharı/kg kuru hava) temsil etmektedir.



**Şekil A.3.** Kurutma sistemi

Havanın nemliliği (kg su buharı/kg kuru hava) kurutucu gazın ve su buharının gaz sabitleri ( $R_g$ ,  $R_v$ ) ile kısmi buhar basınçları cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$Y = \frac{m_v}{m_g} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_g V}{R_g T}} = \frac{R_g}{R_v} \frac{P_v}{P - P_v} \quad (A2)$$

Bu denklikte gerekli olan kısmi buhar basıncı ( $P_v$ ) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{ws}} \quad (A3)$$

Eşitlikte yer alan  $\phi$  bağıl nemi,  $P_v$  ve  $P_{ws}$  ise sırasıyla kısmi buhar basıncı ve doymuş buhar basıncını (Pa) göstermektedir. Bağıl nem, belirli bir sıcaklıktaki gazın kısmi buhar basıncının aynı sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına olan oranıdır.  $P_{ws}$  yatak çıkışında sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir:

$$P_{ws} = e^{(77.3450 + 0.0057 T - 7235/T)} / T^{8.2} \quad (A4)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak aşağıdaki prosedür izlenmiş ve hesaplamalar şu şekilde yürütülmüştür:

- Gaz çıkış kanalında anlık (2 saniye aralıklarla) bağıl nem ölçümü yapılarak kaydedilir,  $\varphi(t)$ .
- Gaz çıkışındaki sıcaklık ölçülür ve gaz giriş sıcaklığından birkaç derece düşük olarak sabit tutulur,  $T_{out}$ .
- Ortam sıcaklığı,  $T$ , ve basıncı,  $P$ , ölçülür.
- Doygun buhar basıncı,  $P_{ws}$  hesaplanır.
- Kısmi buhar basıncı,  $P_v(t)$ , ve kurutucu gazın nemliliği (  $Y(t)$  ) anlık bağıl neme göre hesaplanır.
- Çıkış nem miktarı hava kütleli debisi ile çarpıldıktan sonra gr su cinsinden elde edilir.
- Her 2 saniye için kütle dengesi yapıp içerdeki parçacıklarda bulunan nem değeri hesaplanır.
- Bulunan değerler 2 saniye zamana bölerek kurutma hızı elde edilir.

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. GÖRKEM KÜLAH
Proje No:	112M231
Proje Başlığı:	Doğal Zeolit Klinoptilolitin Akış Borulu Taşkın-Akışkan Yatakta Kurutulması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	MURAT KÖKSAL
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. KİMYA MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/09/2012 - 15/09/2015
Onaylanan Bütçe:	234290.0
Harcanan Bütçe:	207426.45
Öz:	<p>Mikotoksinler, depolanan tahıllar ve kaba yemler üzerinde gelişen belirli küf formlarının toksik etkili metabolik yan ürünleridir. Mikotoksinler, son derece toksik, çoğu kansorejen, teratojen ve mutajen maddelerdir. Dolayısıyla, mikotoksinli ürünlerin doğrudan yenilmesi veya bu tip yem ile beslenen hayvanların et ve süt ürünlerinin yenilmesi sağlık açısından büyük risk oluşturmaktadır. Yemlerde bulunan mikotoksinlerin bazıları yem içerisinde salgılanırken, bazıları da yemler hayvanlar tarafından alındıktan sonra hayvan vücudunda salgılanırlar. Son yıllarda, yemlerde bulunan mikotoksinleri adsorbe edebilen ve hayvan sağlığını bozmayan doğal zeolitlerin yem katkısı olarak kullanılması gündeme gelmiştir. Zeolit mineralinin hayvan yemi katkı maddesi olarak güvenilir şekilde kullanılabilmesi için madenin çıkarıldıktan ve öğütüldükten sonra kurutma işlemine tabi tutularak nem değerinin yaş temelde maksimum %8 değerinde sabitlenmesi gerekmektedir. Ancak ülkemizde endüstriyel üretimi yapılan zeolit minerali yaz aylarında yüzey madenciliği ile çıkartılmaktadır ve çıkarılan madenin nem değeri %16 ile %24 arasında değişmektedir. Dolayısıyla bu projenin amacı, kısa kurutma süresi ve düşük enerji sarfıyatı ile yüksek verimde çalışacak, laboratuvar ölçekli, akış borulu bir taşkın-akışkan yatak kurutucu sistemi tasarlamak ve kurmaktır. Bu amaçla, öncelikle soğuk yatak hidrodinamik çalışmalar yapılmış, gaz-katı akış dinamiği açısından en uygun tasarım ve işletim koşulları bulunmuştur. Elde edilen bu koşullar için 30 derecelik konik açığa sahip, akış borulu bir taşkın-akışkan yatak kurutucu tasarlanıp, imal edilmiş ve kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamı itibarıyla literatürde bulunan akış borulu taşkın-akışkan yataklar konusundaki en kapsamlı çalışmalardan biri, mikron boyutunda parçacıklarla yapılan ise ilk kapsamlı çalışmadır. Elde edilen sonuçlar, zeolit parçacıklarının kurutulması için endüstriyel boyutta kurulacak olan sistemlerin tasarımına ışık tutacaktır. Ayrıca, tasarlanan sistem mikronize boyuttaki parçacıkların uygulamalarında gösterdiği üstünlüklerden dolayı sadece madencilik sektöründe değil, kimya ve ilaç sektörlerinde de kullanılabilir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Zeolitin kurutulması, mikronize parçacık, akış borulu taşkın-akışkan yatak kurutucu, hidrodinamik
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- V. Nasirimarekani, A.G. Karabiyik, M. Koksall, G. Kulah, "Hydrodynamic characteristics of fine zeolite particles in a conical spout-fluid bed with a draft tube" (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),